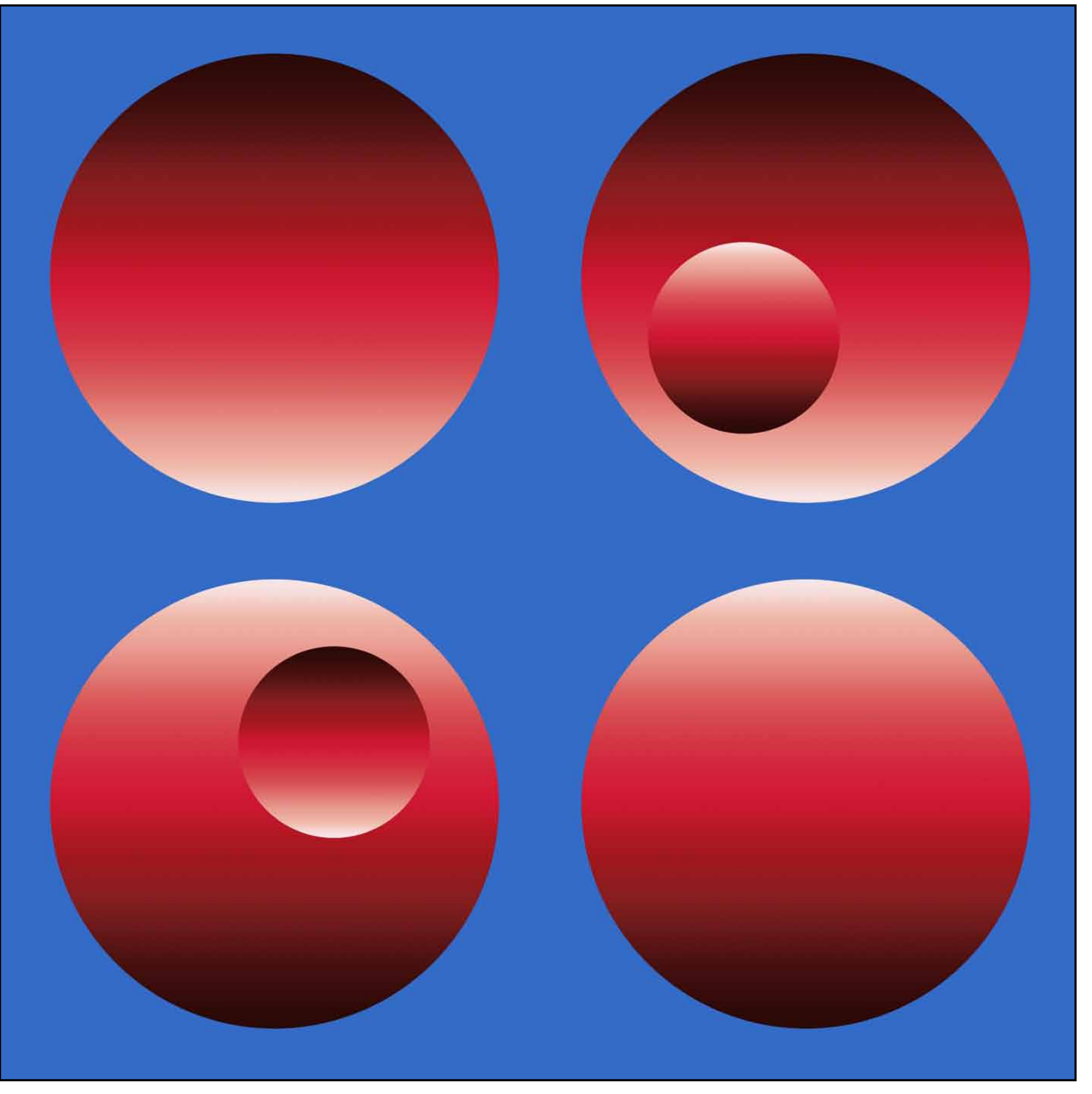
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



PERCEPCION DE LA PROFUNDIDAD

Octubre 1988
450 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Octubre de 1988 Número 145

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

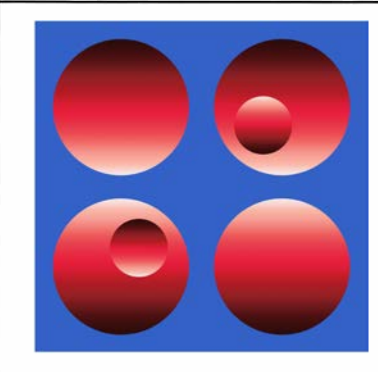
Manuel Crespo: *El desafío de la lluvia ácida*; Juan Ramón Medina: *Fidelidad de la duplicación del ADN*; Ramón Pascual: *Una cuarta familia de partículas*; Julio Rodríguez Villanueva e Isabel García Acha: *Medicamentos fotoactivados*; J. Manuel García de la Mora: *Percepción de la forma a partir del sombreado*; Amando García Rodríguez: *Obtención de imágenes de rayos X con máscaras codificadas*; Luis Bou: *El computador del Dr. Atanasoff* y *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Luis Alonso, Juan Gallardo y Emilio Lledó

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
9	Julius Chang, Universidad estatal de Nueva York en Albany
10-13	Bob Conrad
14	James E. Vogelmann, Universidad de New Hampshire (*izquierda*); Ann Carey, Servicio Forestal de los Estados Unidos (*derecha*)
15-16	Bob Conrad
18	Ferran Rodà, Universidad Autónoma de Barcelona
21-25	Ian Worpole
26	Jack D. Griffith, Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill
31	R.-M. Alvarado-Mallart y C. Sotelo
32-33	R.-M. Alvarado-Mallart, C. Sotelo y Gustavo Hormiga
34	R.-M. Alvarado-Mallart y C. Sotelo
35-37	R.-M. Alvarado-Mallart, C. Sotelo y Gustavo Hormiga
38	R.-M. Alvarado-Mallart y C. Sotelo
47	CERN, Centro Europeo de Investigación Nuclear (*arriba*); Gabor Kiss (*abajo*)
48-56	Gabor Kiss
59	Richard L. Edelson
60-65	George V. Kelvin
69	Vilayanur S. Ramachandran
70-71	George V. Kelvin
72	George V. Kelvin (*arriba*), Ron James (*abajo, a la izquierda*), George V. Kelvin (*abajo, centro y a la derecha*)
72-75	George V. Kelvin
79	Gerald K. Skinner
80-82	Andrew Christie
83	Gerald K. Skinner
87	Tom Molesworth
88	Allan R. Mackintosh
89-92	George Retseck
94-97	Michael Goodman
99	Benno Hess, Instituto Max Planck de Fisiología de la Nutrición y la Fundación Volkswagenwerk, Alemania Occidental
100	Laurie Grace
101	Cortesía de la heredad de Fritz Goro (*izquierda*), Benno Hess (*derecha*)



LA PORTADA demuestra el importante efecto que ejerce, sobre la interpretación de la forma a partir del sombreado, la tendencia del sistema visual humano a suponer que la iluminación procede de arriba (véase "Percepción de la forma a partir del sombreado", por Vilayanur S. Ramachandran, en este mismo número). Los discos pequeños superpuestos a los mayores ofrecen un ejemplo clarísimo: el de la derecha sugiere una esfera y, el de la izquierda, una cavidad. Si damos la vuelta a la revista, las formas invierten su sentido de la profundidad.

Ilustración de portada de George V. Kelvin, Science Graphics

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

– Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
– En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
– El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos cincuenta años

Bernardino de Sahagún fue profesor en el Colegio Imperial de Santa Cruz, en Tlatelolco, que había sido fundado poco antes. Allí murió en 1590, tras una larga vida llena de viajes, dificultades y trabajos.

Como es sabido, Bernardino de Sahagún fue el primer investigador europeo de la cultura de los indios mexicanos, concediendo particular atención a sus aspectos científicos. El método que utilizó para elaborar, entre 1558 y 1569, su *Historia general de las cosas de Nueva España* es generalmente considerado como uno de los más importantes antecedentes del que emplea la moderna antropología cultural. "No sólo utiliza pinturas indígenas —afirma Esteve Barba— sino que las suscita para utilizarlas. No sólo escribe en náhuatl, que conoce a la perfección, sino que investiga además la naturaleza del idioma que emplea, considerándolo como el mejor auxiliar para sus trabajos de investigación etnográfica... Es un etnólogo y un lingüista que se adelanta en varios siglos a su época." Sahagún dedica amplios estudios al calendario, la astrología y la medicina. No obstante, desde nuestro punto de vista, destaca especialmente el libro undécimo de su obra, titulado "De las propiedades de los animales, aves, peces, árboles, hierbas, flores, metales y piedras, y de los colores", que es una auténtica exposición sistemática de la zoología, la botánica y la mineralogía de los indios mexicanos. Resulta muy significativa la "minuta" o formulario de preguntas —reconstruido por Garibay— que Fray Bernardino propuso a sus informantes en lo que respecta a los animales:

"1. El nombre del animal, y si tiene varios, díganse. Agréguese la razón de haberle dado este nombre.
2. Cómo es, qué aspecto, cualidades y forma tiene.
3. En dónde se cría y anda.
4. Qué hace, cuál es su oficio, bueno o malo, o si no tiene.
5. Cómo se proporciona el alimento. Díganse los modos raros para ello, si los tiene.
6. Cómo se coge o caza.
7. Costumbres y particularidades dignas de conocerse.
8. Historias populares en que entre el animal.
9. Dichos salidos de sus costumbres, o modos que tiene".

A pesar de la actitud que puede personificarse en Bernardino de Sahagún y también en Francisco Hernández, cuya máxima expresión institucional fue el Colegio de Tlatelolco, las culturas científicas de los indios americanos no pudieron resistir el traumatismo que significó la colonización española y quedaron reducidas a una actividad marginal. Sin embargo, al mismo tiempo que las desarticulaba o destruía, dicha colonización creó los cauces que transmitieron al mundo europeo muchos de sus elementos. Ambas funciones contrapuestas llegaron a coincidir a veces en una misma persona. Diego de Landa, por ejemplo, fue uno de los principales responsables de la destrucción de los textos mayas. "Hallámosles gran número de libros —afirma— y porque no había cosa en que no hubiera superstición y falsedades del demonio, se los quemamos todos, lo cual a maravilla sentían y les daba pena." Sin embargo, su *Relación de las cosas de Yucatán* tiene para el conocimiento de la cultura científica maya una importancia sólo comparable a la del libro de Bernardino de Sahagún para la mexicana.

Como ejemplo del contenido del libro undécimo de la *Historia general de las cosas de Nueva España* reproduciremos a continuación el capítulo dedicado a los papagayos:

"Hay muchas maneras de papagayos en esta tierra; a unos de ellos llaman *toznene*; tienen el pico amarillo y corvado como gavilán, tienen la cabeza colorada; críanse en la provincia que se llama *Cuextlan*. Cuando son pequeños están en el nido, son verdes en el pescuezo y la cola, y las alas, y los codillos tienen verdes y amarillos; las plumas pequeñas de las alas, que cubren las plumas grandes de las alas, y las plumas del pecho y la barriga son amarillas oscuras; llámanse *xólotl*; las orillas de las plumas de las alas y de la cola son coloradas. Crían, hacen nido en los riscos muy altos, y en las ramas de los árboles muy altos; en estos lugares hacen sus nidos, y ponen sus huevos, y empollan sus huevos y sacan sus pollos; en estos lugares los toman y los amansan.

"Otra manera de papagayos llaman *toztli* y son estos mismos cuando ya son grandes y vuelan y crían; entonces tienen las plumas muy amarillas y resplandecientes; cuanto más va creciendo en años, este papagayo tanto más va amarilleciéndose, y por esto le llaman *toztli*, que quiere decir cosa muy amarilla.

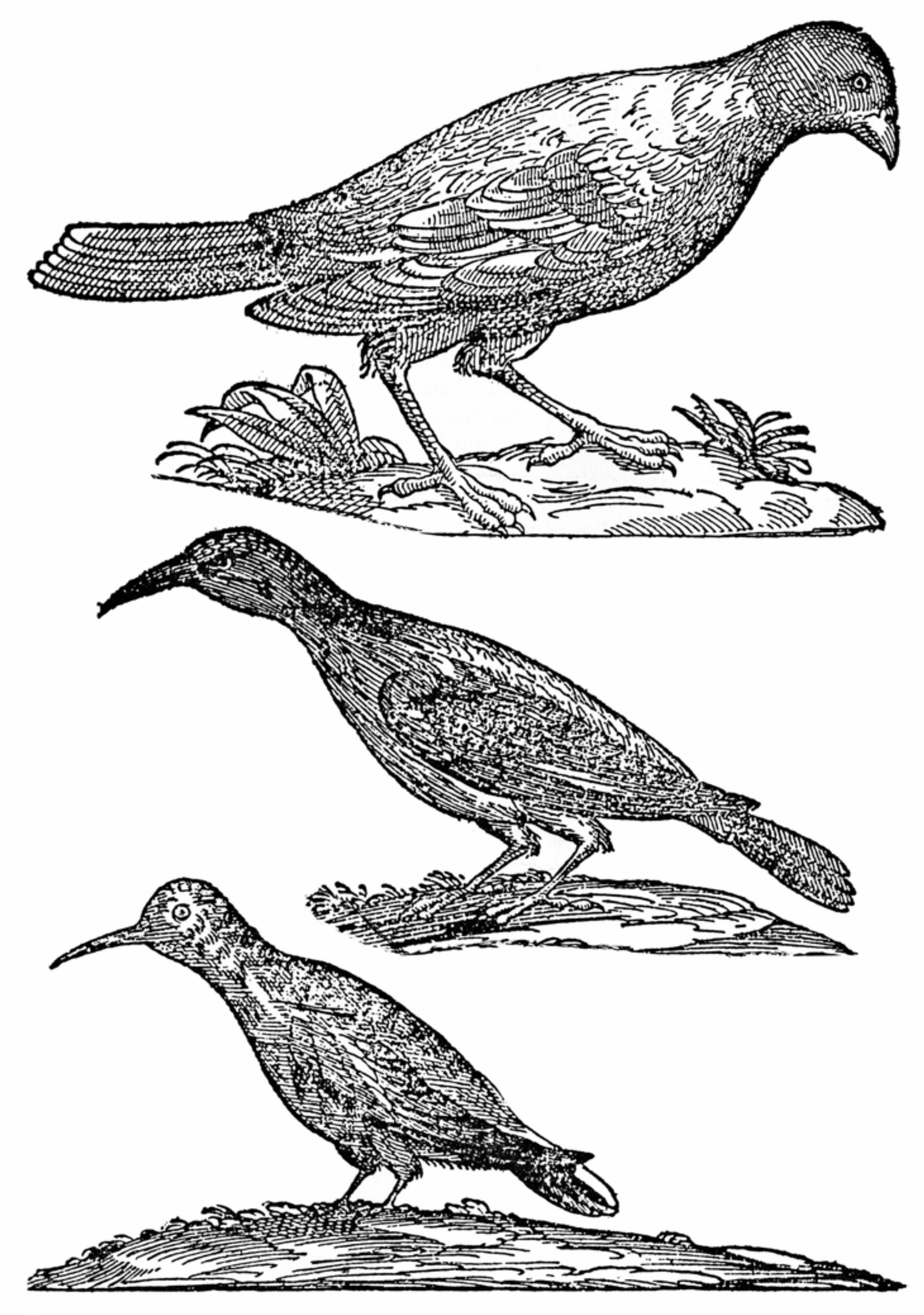
"Hay otra manera de papagayos que llaman *alo*; criándose en la provincia que llaman *Cuextlan*. Viven en lo alto de los montes y riscos, crían en las espesas arboledas; son domesticables; tienen el pico amarillo y corvo como halcón; tienen los pies y piernas callosos; tienen la lengua áspera y dura y redonda, y prieta; los ojos tienen colorados y amarillos; tienen el pecho amarillo, y también la barriga, las espaldas moradas, las plumas de la cola y de las alas las tienen bermejas, casi coloradas; llámanse estas plumas *cuetzalin*, que quiere decir llama de fuego. La cobertura de las alas, que cubre las extremidades de las plumas grandes, y también las que cubren las extremidades de la cola, son axules, con unos arreboles de colorado.

"Otra manera de papagayos hay que llaman *cocho* (y) es muy semejante al que llaman *toznene*; tiene el pico amarillo y corvo, la cabeza colorada, y todas las plumas del cuerpo moradas, los codillos y todo lo exterior de las alas, tiene colorado oscuro, mezclado con amarillo; las plumas pequeñuelas que están sobre la carne del ala que llaman *xólotl*, son amarillas mezcladas de coloradas; el vello, como pelo malo, que tiene cerca de la cola y cerca de las alas, es colorado mezclado de amarillo. Esta ave canta y parla cualquier lengua que le enseñen; arrienda a los otros animales, responde diciendo lo que le dicen, cantando lo que le cantan; es muy dócil.

"Hay otra manera de papagayos que se llaman *quiliton*; son éstos chiquillos, tienen la cabeza colorada y el cuerpo todo verde, los escudos de las alas colorados; comen maíz y frijoles, aprenden a hablar y hablan lo que les muestran.

"Hay otra manera de papagayos que se llaman *tlalacuezalli*; críanse en las montañas, tienen el pico amarillo y corvo, tienen la cabeza colorada, tienen los codillos de las alas del color encarnado oscuro, tienen el pecho amarillo oscuro, tienen las alas y la cola y las espaldas de color verde.

"Hay unas avecitas en esta tierra que son muy pequeñitas, que parecen más moscardones que aves; hay muchas maneras de ellas, tienen el pico chiquito, negro y delgadito, así como aguja; hacen su nido en los arbustos, allí po-



Entre las numerosas aves mexicanas de las que Bernardino de Sahagún se ocupa en su Historia general de las cosas de Nueva España, *figuran el* toznene *(papagayo amarillo,* Amazona oratrix*)* (arriba*) y el* quetzalhuitzitzilin *(colibrí quetzal,* Selasphorus platycerus*)* (centro y abajo*). Los grabados que reproducimos proceden de la edición romana (1628) de los materiales recogidos en la expedición científica a México (1571-77), dirigida por Francisco Hernández. Bernardino de Sahagún, el Colegio Imperial de Santa Cruz de Tlatelolco y el propio Hernández fueron los máximos representantes de una actitud de respeto hacia la cultura mexicana, que finalmente resultaría desarticulada o destruida por la colonización.*

nen sus huevos y los empollan y sacan sus pollos; no ponen más de dos huevos. Comen y manteniéndose del rocío de las flores, como las abejas, son muy ligeras, vuelan como saeta; son de color pardillo. Renuévanse cada año: en el tiempo del invierno cuélganse de los árboles por el pico, allí colgados se secan y se les cae la pluma; y cuando el árbol torna á reverdecer él torna a revivir, y tórnale a nacer la pluma, y cuando comienza a tronar para llover entonces despierta y vuela y resucita. Es medicinal, para las bubas, comido, y el que los come nunca tendrá bubas; pero hace estéril al que los come.

"Hay una de estas avecitas que se llaman *quetzalhuitzitzilin*, (que) tienen las gargantas muy coloradas y los codillos de las alas bermejos, el pecho verde y también las alas y la cola; parecen a los finos *quetzales*. Otras de estas avecitas son todas azules, de muy fino azul claro, a manera de turquesa resplandeciente.

"Hay otras verdes claras, a manera de hierba. Hay otras que son de color morado. Hay otras que son coloradas, y mezcladas con pardo. Hay otras que son de color morado claro. Hay otras que son resplandecientes como brasa. Hay otras que son leonadas con amarillo. Hay otras que son larguillas, una de ellas son cenicientas, otras son negras; estas cenicientas tienen una raya de negro por los ojos, y las negras tienen una raya blanca por los ojos.

"Hay otras que tienen la garganta colorada y resplandeciente como una brasa; son cenicientas en el cuerpo, y la corona de la cabeza y la garganta resplandeciente como una brasa.

"Hay otras que son redondillas, cenicientas, con unas motas blancas.

"Hay otra avecilla que se llama *yollotótotl*; críase en la provincia que se llama *Teotlixco*, es hacia la Mar del Sur; es ave pequeñuela como una codorniz. Llámanse *yollotótotl* porque los habitadores de aquella provincia dicen que los corazones de los difuntos, o sus ánimas, se vuelven en aquella ave. Su canto es dulce y suave, la cabeza y el pecho y las espaldas son entre pardo y amarillo, la cola tiene negra, las plumas de las alas tiene ametaladas y las puntas blancas; es de comer.

"Hay una ave que se llama *pohpocales*, y vive en las montañas; tiene este nombre porque canta diciendo *pohpocales*, a la puesta del sol, y antes que sale canta diciendo *pohpocales*; mora en las barrancas en las provincias de *Toztlan* y *Catemahco*; come peces, es tamaña como un pato, pero tiene las piernas largas y el pico agudo, redondo y colorado, y los ojos también colorados; tiene la cabeza amarilla oscura; el cuello, y las espaldas, y los pechos y la cola, pardos, y las plumas de abajo la cola pardillas; tiene los pies colorados, y es de comer.

"Hay otra ave que se llama *tecuciltótotl*, y llámase así porque cuando canta dice *tecucilton, tecucilton*; tiene delgada la voz, es del tamaño de una codorniz; es de comer; críase en las provincias de *Teotlixco* y *Toztlan*.

"Hay otra ave que se llama *ixmatlatótotl*; vive en las montañas hacia la Mar del Sur; llámase por este nombre porque su habla o canto es como habla de persona, dice cuando canta *campauee, campauee*, que es una palabra que usa la gente de aquellas partes, y parece que los arrienda; tiene el pico plateado, tiene la cabeza, y el pecho y las alas, y la cola, y todo el cuerpo, y los pies, cenicientos; es de comer".

El desafío de la lluvia ácida

Los efectos de la lluvia ácida en el suelo y embalses no dejan lugar a dudas acerca de la necesidad de controlar sus causas. En la actualidad, los progresos de la tecnología ofrecen soluciones ambiental y económicamente atractivas

Volker A. Mohnen

La atmósfera es depósito y matraz de reacción de multitud de substancias. Muchas de las más importantes –oxígeno, dióxido de carbono y compuestos de nitrógeno y azufre– son producto de la actividad de los seres vivos. A menudo, y en repetidos casos con la ayuda del ciclo del agua, pasan por la atmósfera para, andando el tiempo, absorberse de nuevo en el suelo, el agua superficial o la materia orgánica. Con su tecnología, el ser humano ha contribuido enormemente a la carga atmosférica de algunas de estas substancias, que arrastra consecuencias de largo alcance para la vida y el medio ambiente. Ello resulta clarísimo en el caso de la lluvia ácida: precipitación y partículas que se han acidificado por efecto de la contaminación del aire.

La voz de alarma ante la creciente acidez de la precipitación en Europa y el este de Norteamérica se dio ya en los años sesenta. Desde entonces, buena parte de la atención se ha centrado en los efectos, declarados o sospechados, de la lluvia ácida en los ríos y lagos, con sus poblaciones de vida acuática, y en los bosques. Pero la lista de preocupaciones es mucho más amplia: abarca la contaminación de las aguas subterráneas, la corrosión de estructuras artificiales y, más recientemente, el deterioro de las aguas litorales. Veinte años después, ¿cuál es la magnitud del daño infringido a los ecosistemas, lagos y bosques en particular, que se ha podido confirmar y medir? ¿Cuánto se ha avanzado en el conocimiento de los procesos que dan origen a la lluvia ácida y explican sus efectos? ¿Hasta qué punto se ha podido aplicar dicho conocimiento al control de las emisiones –principalmente de dióxido de azufre, procedente de las centrales eléctricas de carbón y petróleo, y óxidos de nitrógeno, de los motores de los vehículos y las centrales eléctricas– que provocan lluvia ácida?

VOLKER A. MOHNEN es profesor de ciencias de la atmósfera en la Universidad estatal de Nueva York en Albany. Licenciado por la Universidad de Munich, obtuvo allí el título de doctor en 1966. Ha sido director del centro de investigación de las ciencias de la atmósfera de la universidad neoyorquina. Ha formado parte de diversas comisiones de estudio de la química atmosférica y ha asesorado al Congreso sobre el problema de la lluvia ácida. Dirige un programa sobre química de nubes de montaña, en cuyo ámbito investiga los procesos que influyen en la salud de los bosques.

El estudio de estas cuestiones se ha convertido en una empresa científica de gran calado. En el marco del programa nacional de evaluación de la lluvia ácida (que se designa por sus siglas en inglés NAPAP), en vigor desde 1980, muchos organismos del gobierno federal patrocinan investigaciones sobre los procesos atmosféricos que generan lluvia ácida, sus efectos en los ecosistemas y las posibilidades de control. Además, el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica, que recibe fondos de las empresas de servicios públicos, sufraga estudios sobre los efectos de la lluvia ácida e investigaciones sobre técnicas para reducir las emisiones de las centrales eléctricas. El NAPAP no emitirá un informe global hasta 1990. Con todo, son ya muchos los indicios disponibles, suficientes para dejar bien claro que la lluvia ácida, o, con mayor precisión, los contaminantes que la provocan, suponen una interferencia a gran escala en los ciclos biogeoquímicos, a través de los cuales los seres vivos interaccionan con su medio ambiente. Una buena gestión a escala planetaria demanda que se tomen medidas para proteger la integridad de estos ciclos; los medios económicos para hacerlo están al alcance de la mano.

La lluvia ácida constituye una consecuencia directa de los mecanismos de autolimpieza de la propia atmósfera. Las minúsculas gotas de agua que componen las nubes capturan continuamente partículas en suspensión y gases traza solubles. Cuando se origina la lluvia por coalescencia del agua de la nube, arrastra consigo las impurezas de la atmósfera. No todos los gases traza son eliminados por la precipitación, pero el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos a la atmósfera se convierten químicamente en ácidos —sulfúrico y nítrico— que se incorporan con facilidad a las gotitas de las nubes.

Los procesos que convierten los gases en ácidos y los arrastran fuera de la atmósfera comenzaron a operar mucho antes de que el ser humano empezara a quemar grandes cantidades de combustibles fósiles. Procesos naturales como el vulcanismo y la actividad de las bacterias del suelo emiten, asimismo, compuestos de nitrógeno y de azufre. Pero la actividad económica humana ha otorgado a estas reacciones un protagonismo inmenso. Reacciones que se activan con la luz solar y dependen de la abundante provisión atmosférica de oxígeno y agua.

El ciclo de reacciones se desarrolla en la troposfera: los 10 o 12 kilómetros inferiores de la atmósfera. Empieza cuando un fotón de luz solar choca con una molécula de ozono (O_3), que puede haber descendido de la capa de ozono estratosférica o haberse formado en la propia troposfera por acción de contaminantes que contienen carbono y nitrógeno. El resultado es una molécula de oxígeno (O_2) y un solitario átomo, muy reactivo, de este mismo elemento, que se combina con una molécula de agua (H_2O) para formar dos radicales hidroxilo (HO). Esta especie química, infrecuente y activa, transforma el dióxido de nitrógeno (NO_2) en ácido nítrico (HNO_3) e inicia las reacciones que transforman el dióxido de azufre en ácido sulfúrico (H_2SO_4).

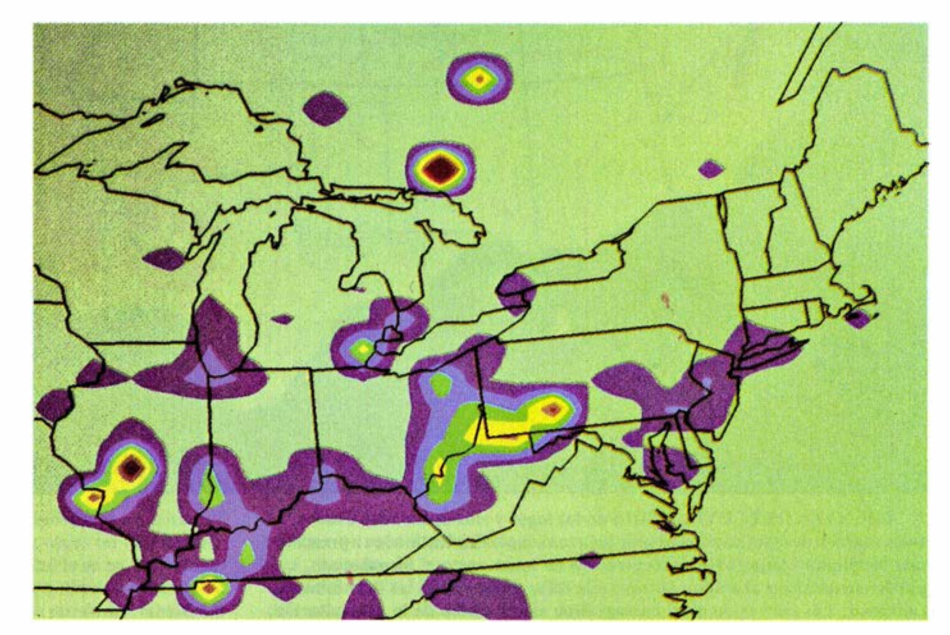
La concentración del radical hidroxilo en la atmósfera no llega a una parte por billón, pero resulta inagotable: varios de los procesos de oxidación que desencadena acaban por regenerarlo. Así, un subproducto de la oxidación inicial del dióxido de azufre es el radical hidroperoxilo (HO_2), que reacciona con el óxido nítrico (NO) para producir dióxido de nitrógeno y un nuevo radical hidroxilo. En realidad, cada radical hidroxilo puede oxidar miles de moléculas sulfurosas. Por consiguiente, lo único que determina cuánto ácido se producirá será la cantidad de contaminante presente en el aire.

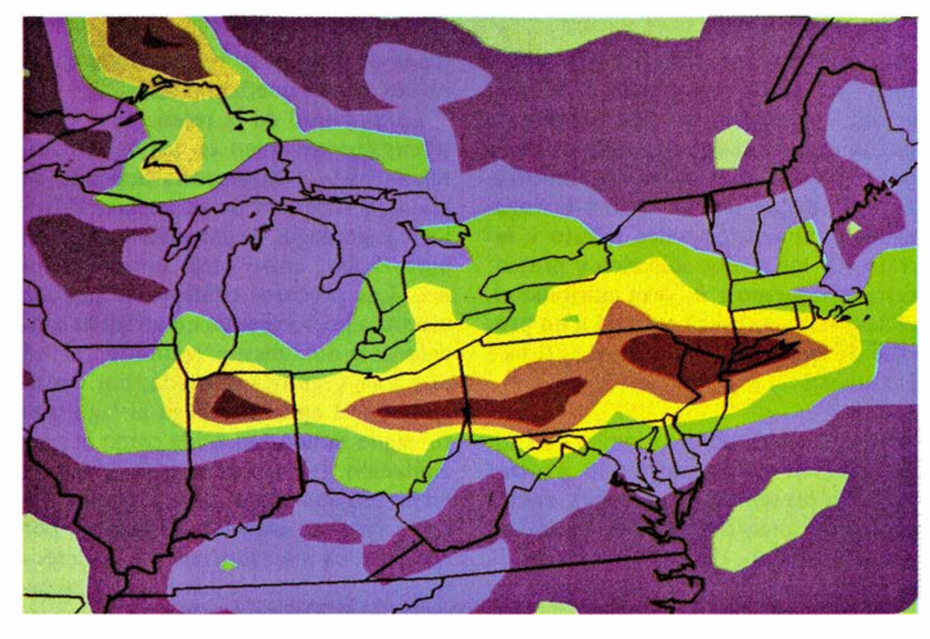
Los ácidos sulfúrico y nítrico formados a partir de contaminantes gaseosos pueden abrirse paso fácilmente en las nubes. (También se forma algo de ácido sulfúrico directamente en las gotitas de la nube, a partir de dióxido de azufre y peróxido de hidrógeno.) El ácido nítrico se disuelve en seguida en las gotitas de la nube. El ácido sulfúrico originado mediante reacciones en fase gaseosa se condensa para formar gotas microscópicas, de aproximadamente 0,1 a 2 micrometros (millonésimas de metro) de diámetro, que son un componente de la neblina estival del oriente estadounidense. Una fracción de estas partículas de sulfato se deposita en el suelo, en un proceso conocido por deposición seca. (La deposición seca designa también la captura de dióxido de azufre, gaseoso, por la vegetación.) No obstante, la mayor parte se incorpora en las nubes. La humedad se condensa con facilidad en cualquier superficie existente −núcleo de condensación−; las partículas de sulfato son núcleos de condensación idóneos, convirtiéndose en gotitas nubosas que contienen ácido sulfúrico diluido.

Los ácidos sulfúrico y nítrico de las antedichas gotitas les confieren un *p*H muy bajo. En el este de Estados Unidos, el agua recogida cerca de la base de las nubes, durante el verano, ofrece un *p*H en torno a 3,6, pero se han registrado valores inferiores, de 2,6. (Un *p*H de 7 es neutro; cuanto menor es el número, más fuerte es la acidez.) En el área de Los Angeles, el *p*H de la niebla ha alcanzado valores de 2: la acidez del zumo de limón, aproximadamente.

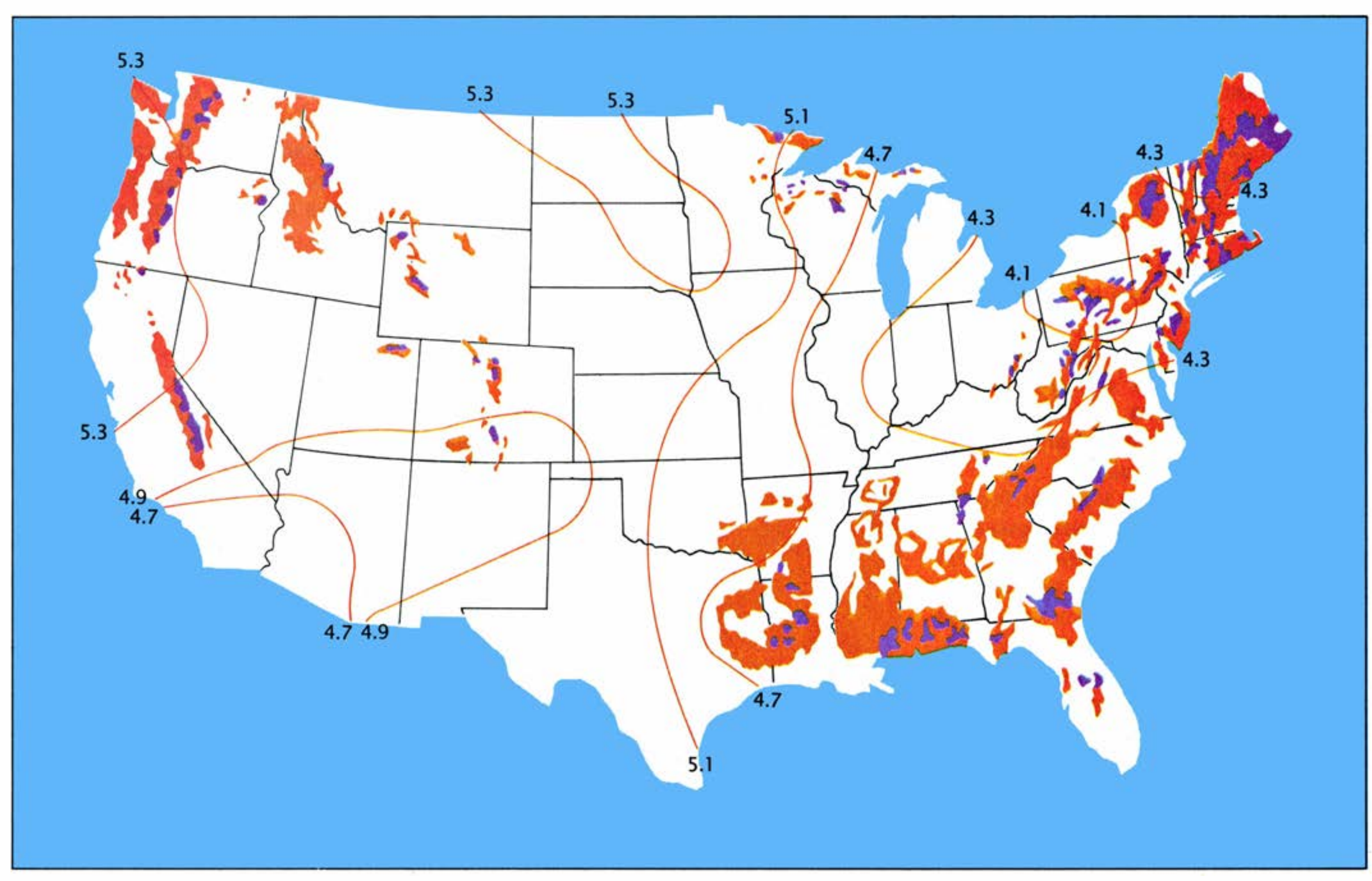
Estas cifras de altísima acidez se dan sólo cerca de la base de las nubes; las zonas superiores están bastante más limpias. El suelo y la vegetación envueltos en nubes acidificadas, como pueden estarlo los bosques de elevada altitud, quedan en contacto directo con la base de las nubes, extraordinariamente ácida. Pero las partículas de precipitación acopian agua de un buen espesor de nube. La consiguiente dilución reduce la concentración de compuestos de azufre y nitrógeno en la precipitación, en un factor que varía entre 3 y 30; y reduce la acidez entre 0,5 y 1 unidad de *p*H, con un promedio de 4,2 para la región nororiental de los Estados Unidos.

La lluvia ácida puede caer a centenares de kilómetros del foco de contaminación. Allí donde se deposita experimenta un nuevo episodio de alteraciones físicas y químicas, que pueden rebajar la acidez y modificar las características químicas del agua que, a la postre, llega a los ríos y lagos. Los suelos alcalinos −por ejemplo, los ricos en caliza− pueden neutralizar el ácido directamente. En los suelos algo ácidos −típicos de los bosques de coníferas,





1. DEPOSICION DE ACIDO SULFURICO durante un aguacero de tres días, simulada por ordenador. La figura superior muestra la distribución de las emisiones de azufre (principalmente en forma de dióxido de azufre) en el noreste de Estados Unidos y el sur de Canadá, que sirve de entrada para el modelo. El color pálido de fondo representa los niveles de emisión más bajos; el rojo, los más altos. Las centrales eléctricas de carbón, del medio oeste, dan razón de la mayor parte de las fuentes estadounidenses; la fundición de cobre-níquel de Sudbury, Ontario, visible justo al norte del lago Hurón, es la mayor de las fuentes canadienses. Tomando como base las condiciones meteorológicas del 22 al 24 de abril de 1981, el ordenador simula el transporte de compuestos de azufre y de otros compuestos químicos relevantes, su transformación en ácido sulfúrico y su deposición durante un período de tres días. La figura inferior muestra cómo se deposita el ácido sulfúrico con la lluvia; el color pálido señala las zonas que recibieron menos de 10 gramos de azufre por hectárea; el rojo, las que recibieron más de 260 gramos por hectárea. El modelo de ordenador (conocido por "modelo regional de deposición ácida") fue preparado por Julius Chang y sus colegas de la Universidad de Nueva York en Albany, con el apoyo de la Oficina estadounidense para la Defensa del Medio Ambiente.



2. AMENAZA DE LLUVIA ACIDA en los lagos y ríos de Estados Unidos. El color marrón designa las zonas donde las aguas superficiales tienden a presentar una alcalinidad baja (baja concentración de iones como el bicarbonato, que pueden neutralizar el ácido); las áreas de color púrpura son las de mínima alcalinidad. Las curvas de nivel cartografían el *p*H medio de la precipitación. Donde la precipitación ácida (*p*H bajo) coincide con aguas superficiales de baja alcalinidad, los lagos y los ríos corren el riesgo de acidificarse. (Con todo, la alcalinidad no es el único factor que controla la sensibilidad a la lluvia ácida.) James M. Omernik y sus colegas de la Oficina estadounidense para la Defensa del Medio Ambiente compilaron los datos relativos a la alcalinidad del agua.

perennifolios, de Europa, Canadá y Estados Unidos–, expuestos a la lluvia ácida, los efectos de esta deposición pueden sufrir mella por acción de otros dos procesos: el ácido queda inmovilizado a medida que el suelo y la vegetación retienen los iones sulfato y nitrato (de los ácidos sulfúrico y nítrico, respectivamente); u, otra posibilidad, el ácido se neutraliza merced a un proceso de intercambio de cationes (iones positivos).

En el intercambio catiónico, los iones de calcio, magnesio y otros metales presentes en muchos suelos ocupan el lugar de los iones de hidrógeno. La fuente de iones metálicos es la meteorización de la roca madre, es decir, la disolución de los minerales por la precipitación y el agua subterránea cargados de dióxido de carbono disuelto, que libera iones metálicos positivos junto con aniones, o iones negativos, de bicarbonato (HCO_3^-). Así, cuando se añade ácido sulfúrico al suelo, el sulfato (SO_4^{2-}) del ácido puede desplazar los iones de calcio o magnesio. A medida que la disolución de sulfato arrastra los cationes metálicos del suelo, los iones de hidrógeno responsables de la acidez se van quedando atrás.

La amplitud de la retención y el intercambio catiónico en las aguas subterráneas y la escorrentía depende de las características de la cuenca hidrológica: geología, vegetación y régimen hidrológico, entre otras consideraciones. Los procesos edáficos no pueden afectar a la escorrentía en un suelo congelado o totalmente saturado, ni en una roca granítica desnuda; por consiguiente, el agua que llega al lago o al río sigue siendo tan ácida como la precipitación. Incluso en el caso de que la lluvia sea absorbida, esos procesos podrían resultar estériles. El cuarzo, por ejemplo, es muy resistente a la meteorización y carece de los metales necesarios para el intercambio de cationes; por consiguiente, la filtración a través de arenas cuarzosas hace muy poco por neutralizar el ácido. En cambio, en cuencas con suelos ricos en iones intercambiables, la liberación de ácido en el lago o en el río puede experimentar cierto retardo, como mínimo hasta el agotamiento de la capacidad de retención o de neutralización.

¿Qué ocurre cuando la escorrentía o las aguas subterráneas acidificadas vierten en un lago o un río? Una masa de agua puede contener bicarbonato y otros iones básicos procedentes de la meteorización de la roca, capaces de neutralizar una entrada de ácido, impidiendo que el *p*H caiga por debajo de un valor en torno a 5. La concentración de estos iones neutralizadores recibe el nombre de capacidad de neutralización de ácidos (CNA), cuyo valor ofrece una medida de la sensibilidad de un lago a la acidificación. Un lago con una CNA muy alta está protegido contra la lluvia ácida, al menos de momento. Un lago con una CNA de cero se mantendrá sano en tanto permanezca alejado de la lluvia ácida; de lo contrario, cualquier entrada de ácido lo acidificará de inmediato.

Es fácil reconocer un lago acidificado. Tiene la CNA agotada y el *p*H ha caído muy por debajo de 6. Sus aguas contienen altas concentraciones de sulfato y otros iones, como el aluminio, que se movilizan cuando el ácido circula por el suelo. Sustentan, además, una comunidad biológica alterada (o están absolutamente exánimes). Otra cosa es pronosticar la acidificación de

un lago con una CNA baja aunque positiva todavía. La retención o neutralización del ácido que se deposita en la cuenca puede retrasar el agotamiento de la CNA por un tiempo. Por otro lado, la cuantía de CNA de un lago no es cerrada. Aun agotada por una entrada de ácido, puede renovarse mediante la meteorización de los minerales en la periferia del lago. Para predecir cómo reaccionará un lago ante una entrada sistemática de ácido, hay que conocer no sólo su CNA, sino también a qué velocidad se repone ésta y durante cuánto tiempo se podrá mantener dicha tasa de reposición.

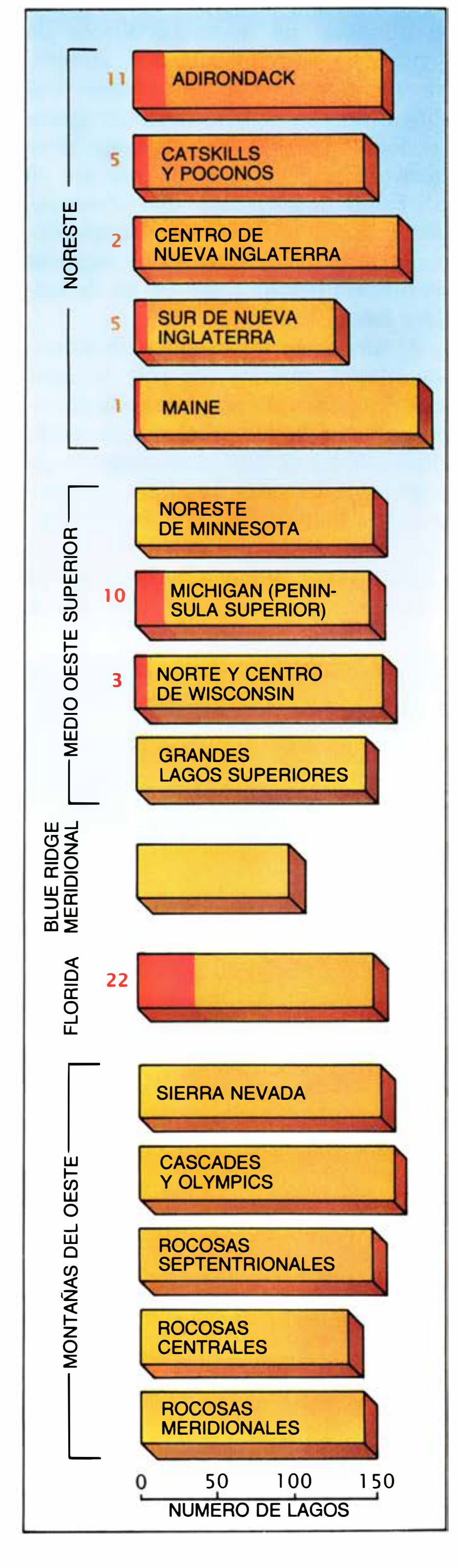
Por consiguiente, son estos procesos y su interacción los que establecen si un determinado lago se acidificará, y a qué velocidad. Pero queda mucho por averiguar y resulta difícil dar con un sistema que prediga satisfactoriamente su comportamiento. Con todo, no caben dudas acerca de la tendencia general: en regiones donde el suelo es pobre en minerales meteorizables y la deposición ácida es intensa, los lagos se han acidificado. En 1986, un comité de la Academia Nacional de Ciencias compiló las medidas de pH y alcalinidad (una estimación de la capacidad de neutralización, similar a la CNA) obtenidas entre los años veinte y cuarenta en varios centenares de lagos de Wisconsin, New Hampshire y Nueva York, y comparó esos datos con mediciones recientes. En ese invervalo, según descubrió el comité, el pH y la alcalinidad aumentaron, en promedio, en los lagos de Wisconsin, y permanecieron más o menos invariables en los de New Hampshire. En Nueva York, sin embargo, y en particular en las montañas Adirondack, los datos de ciertos lagos mostraron una tendencia clara a la acidificación.

El comité obtuvo una imagen más completa de la tendencia general a partir de los organismos microscópicos conservados en los sedimentos del fondo de los lagos. A medida que cambia el pH de un lago, lo hace también la población de diatomeas y algas amarillas [crisófitos] que acoge. Cabe identificar las distintas especies de estos minúsculos vegetales por la forma de su esqueleto, lo cual permite reconstruir los cambios habidos, en el tiempo, en el seno de la comunidad específica y, a partir de ahí, los del pH del agua. De los once lagos de las Adirondack estudiados, seis habían incrementado la acidez desde los años treinta, cayendo el pH a valores por debajo de 5,2; la acidificación fue muy rápida durante el período que precedió a los años setenta. El comité no pudo identificar otra causa del cambio de pH que no fuera la lluvia ácida.

La acidificación de los lagos en las Adirondack tiene que ver con la precipitación sumamente ácida de la región (la lluvia recogida en zonas próximas, en el oeste de Nueva York, tiene un pH medio de 4,1: el más bajo de todo el país) y de la escasa capacidad neutralizadora de sus suelos y lagos, asentados sobre granito. La reciente Encuesta Nacional de Aguas Superficiales recoge otras regiones del país donde la CNA de los ríos y lagos tiende a ser baja, lo que las deja a merced de la lluvia ácida. La encuesta puso de manifiesto la existencia de altos porcentajes de lagos ácidos en las montañas Pocono del este de Pennsylvania y en la península superior de Michigan, regiones donde la lluvia es muy ácida. La lluvia ácida figura en los primeros puestos de la lista de presuntos culpables del relativamente abultado número de lagos ácidos hallado en el centro y sur de Nueva Inglaterra. Florida presentó una proporción sorprendentemente elevada de lagos ácidos, pero se cree que esta acidez es un reflejo de otras circunstancias, a saber, los ácidos orgánicos producidos por la descomposición de la vegetación en las regiones pantanosas y la escorrentía, rica en fertilizantes, procedente de las tierras de labor.

Maine tiene el porcentaje más bajo de lagos ácidos de todo el noreste, a pesar de que sus suelos y aguas están poco neutralizados. La gran mayoría de los lagos analizados en la alta región de los Grandes Lagos, las montañas meridionales de la Blue Ridge y el oeste escarpado —todos con escasa capacidad de neutralización— se hallaban asimismo sanos, con un pH por encima de 6. Estas regiones se distinguen por su relativa exención de lluvia ácida.

Los indicios no son, ni con mucho, tan definitivos en lo que respecta al otro importante efecto ambiental atribuido a la lluvia ácida: la degradación de los bosques. Desde 1980, muchos bosques del este de los Estados Unidos y de ciertas regiones de Europa vienen sufriendo una drástica pérdida de vitalidad, que podría no estar vinculada a ninguna de las causas habituales, como insectos, enfermedades o envenenamiento directo por un contami-



3. LAGOS ACIDIFICADOS del noreste y el medio oeste superior, donde aparecen concentrados. El gráfico presenta los resultados de la Encuesta Nacional de Aguas Superficiales. El segmento de cada barra coloreado de rojo corresponde al número de lagos muestreados cuya concentración de bicarbonato y otros iones neutralizadores de ácidos está agotada; se incluye también (en el mismo color) ese número expresado en forma porcentual. Los lagos tienen, por lo general, un *p*H bajo y una biota acuática alterada. Se cree que los ácidos sulfúrico y nítrico de los contaminantes dan razón del estado de la mayoría de estos lagos, salvo en Florida, donde refleja la influencia de los ácidos orgánicos procedentes de la vegetación en descomposición y la escorrentía cargada de fertilizantes empleados en agricultura.

nante específico del aire o el agua. Las noticias más negras llegan de Alemania, donde los científicos, alarmados ante la amplitud y la celeridad del deterioro, le dan el nombre de *Waldsterben*, o muerte forestal. Los datos relativos a Norteamérica no son menos preocupantes.

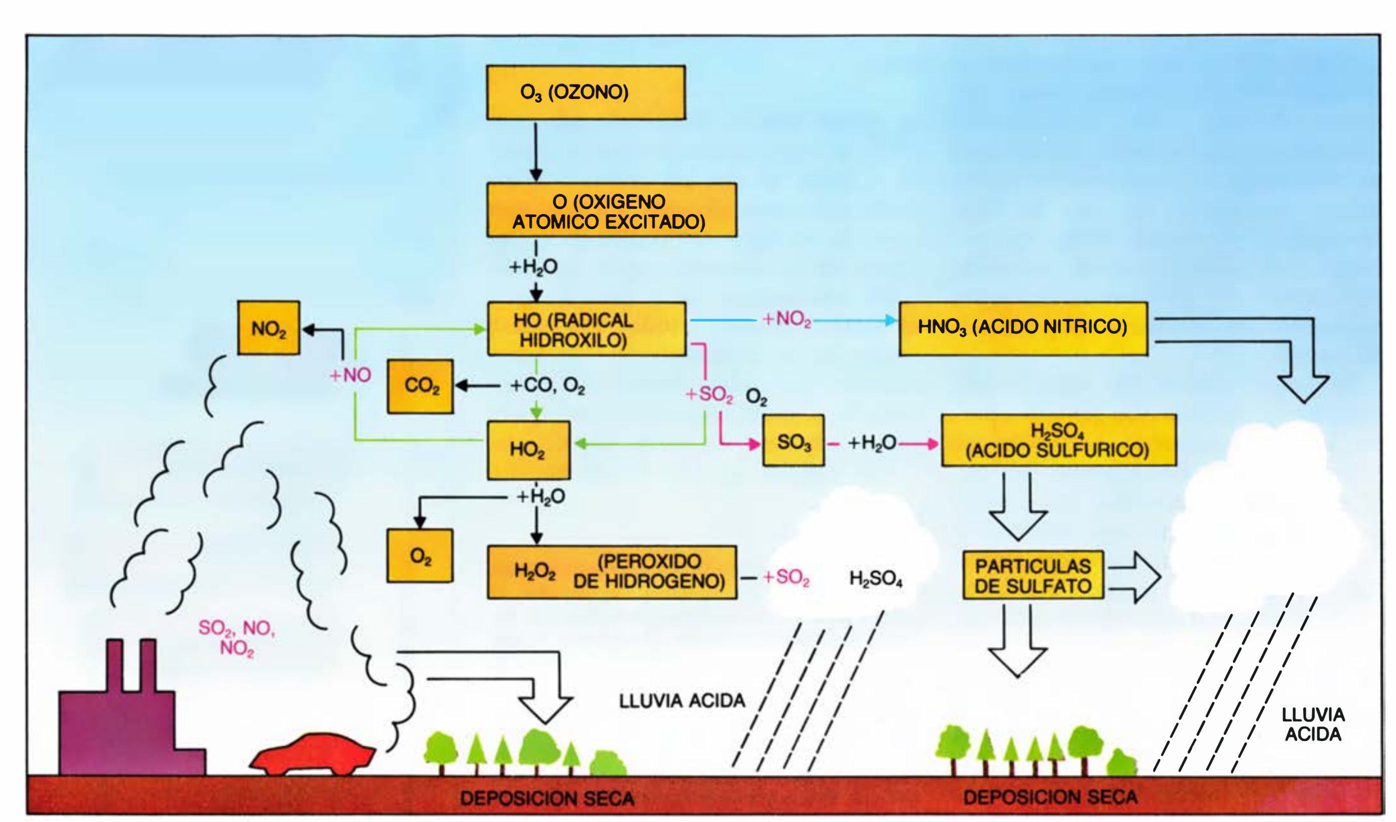
La degradación adquiere tintes espectaculares en los bosques altos de coníferas. En muchos lugares situados por encima de los 850 metros en las Adirondack, las montañas Green de Vermont y las White de New Hampshire, la comparación de los datos históricos con los reconocimientos actuales demuestra que, en los últimos veinticinco años, han muerto más del 50 por ciento de las píceas rojas (*Picea rubens*). A menores altitudes, se han documentado daños tanto en las especies de madera blanda como en las de madera dura.

Al menos en los bosques de altura, los árboles muertos son sólo la señal más dramática de una profunda pérdida de vigor de los árboles. Las mediciones de los anillos de crecimiento en árboles de bosques de altura, del noreste de los Estados Unidos, evidencian una brusca reducción del crecimiento anual desde principios de los años sesenta. El decaimiento se da en bosques de diferentes edades, con distintos historiales de alteración o enfermedad. ¿Qué denominador común podría subyacer a esta mengua del crecimiento?

La participación de la lluvia ácida y de otras formas de contaminación atmosférica es objeto de intensa investigación. Empero, a pesar de las dimensiones del deterioro forestal, no se ha podido establecer todavía un vínculo claro. Nos haremos una idea de las dificultades, si comparamos la reciente degradación forestal con los casos de envenenamiento del bosque por contaminantes del aire. Las fundiciones y las industrias químicas que emiten dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno o compuestos de flúor suelen hallarse rodeadas de árboles muertos. En estos casos existe una correlación evidente entre el deterioro de los árboles, un foco de contaminación específico y una concentración mínima del contaminante. En cambio, los bosques que ahora mueren quedan muy lejos de cualquier foco de contaminación y están expuestos a concentraciones de contaminantes muy por debajo de la concentración umbral que dañaba a los árboles. Si la contaminación atmosférica, y en particular la lluvia ácida, desempeña algún papel en la degradación forestal, probablemente lo hace menos a título de agente letal que como factor de estrés.

Muchas tensiones, bióticas y abióticas, se combinan para minar la salud del bosque. La edad o la dotación genética de los árboles puede constituir una fuente de estrés: un bosque puede ser genéticamente débil o senescente. Otros factores de tensión pueden adoptar distintas formas: enfermedades, insectos, hongos y plantas parásitos, escasez de luz, de agua o de nutrientes esenciales, y daños esporádicos debidos a inundaciones, vendavales y granizos. Esas violencias que, por separado, resultan de fácil superación, pueden conjugarse entre sí con efectos letales o debilitadores. Una secuencia funesta puede comenzar con un estrés de "preparación": una escasez de nutrientes, por ejemplo. Luego, un estrés de "incitación" —piénsese en un invierno muy crudo— puede debilitar gravemente al árbol, que queda entonces a merced de un último estrés de "contribución" —la verdadera causa de la muerte—, a saber, una enfermedad o el ataque de un insecto.

Los contaminantes ácidos y de otro género podrían sumarse al cúmulo de tensiones abióticas —entre otros, suelos exiguos, bajas temperaturas y vientos desecantes— concurrentes en un bosque de gran altitud. En otras pala-

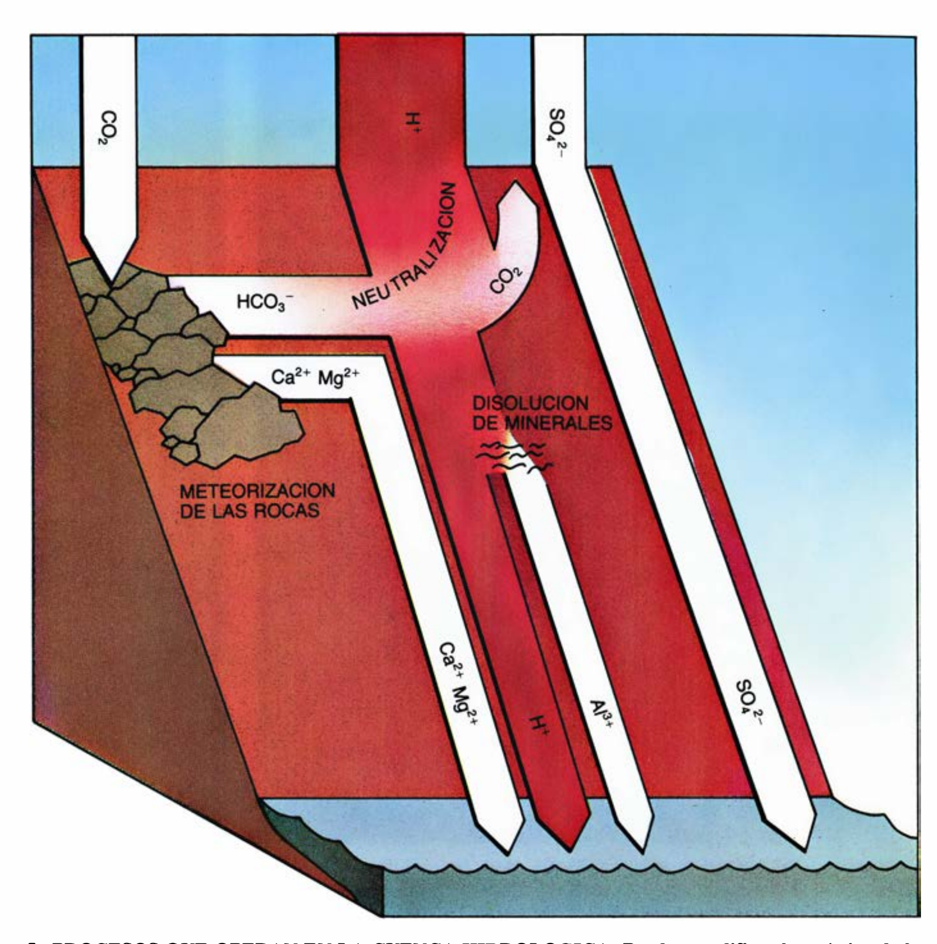


4. LA QUIMICA ATMOSFERICA genera ácido sulfúrico y ácido nítrico a partir del dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno emitidos por la industria y los automóviles. El actor principal es el radical hidroxilo, que se forma cuando una molécula de ozono se descompone y deja libre un átomo de oxígeno que puede reaccionar con el agua. Este radical convierte el dióxido de nitrógeno (NO_2) en ácido nítrico (*azul*) e inicia la conversión del dióxido de azufre gaseoso en ácido sulfúrico (*rojo*). (Una secuencia de reacciones distinta produce ácido sulfúrico a partir del dióxido de azufre y el peróxido de hidrógeno disueltos en el agua de las nubes.) El HO se regenera mediante reacciones (*verde*) en las que interviene el óxido nítrico (NO); los ácidos llegan al suelo con la precipitación.

bras, con un estrés de preparación o varios, los contaminantes dejarían a los árboles en situación de inferioridad a la hora de afrontar tensiones ulteriores. Pero, ¿cuál es la naturaleza del estrés añadido?

Los investigadores, en su mayoría europeos, han propuesto diversos mecanismos hipotéticos, muchos de los cuales remiten, en última instancia, a una deficiencia de nutrientes en el árbol. Varios de ellos operarían en el suelo. El aluminio liberado por el ácido a partir de los minerales del suelo competiría con el calcio en los puntos de enlace de las raíces más finas, reduciendo el suministro de calcio al árbol y menguando su crecimiento. Una alternativa es que el propio suelo pierda nutrientes, al ser lixiviados por la lluvia ácida elementos esenciales como el calcio, el magnesio y el potasio. La muerte de los microorganismos del suelo constituye otro motivo posible de agotamiento nutritivo. Un *p*H bajo y una elevada concentración de aluminio en el suelo pueden mermar las poblaciones de las bacterias que liberan los nutrientes almacenados en la materia orgánica en descomposición. Además, las altas concentraciones de nitrato que resultan de la deposición de ácido nítrico pueden dañar la flora micorrícica: hongos simbiontes que viven en las raíces de las coníferas y ayudan a los árboles a prevenir las enfermedades y a absorber agua y nutrientes.

Según otras hipótesis, los contaminantes ejercerían su efecto por encima del suelo. La lluvia ácida o, lo que es más probable, las gotitas ácidas de las nubes interceptadas por las acículas de las coníferas, podrían extraer nutrientes —en particular, magnesio, calcio y potasio— con mayor celeridad que la empleada por las raíces en reemplazarlos. Un contaminante adicional, el ozono, podría agravar la extracción de nutrientes al degradar la envoltura cérea, impermeable al agua, de las acículas. Más aún, otra hipótesis sostiene que, por sí solo, el ozono podría conducir a un estrés nutritivo, porque puede deteriorar la clorofila, impidiendo así la fotosíntesis.



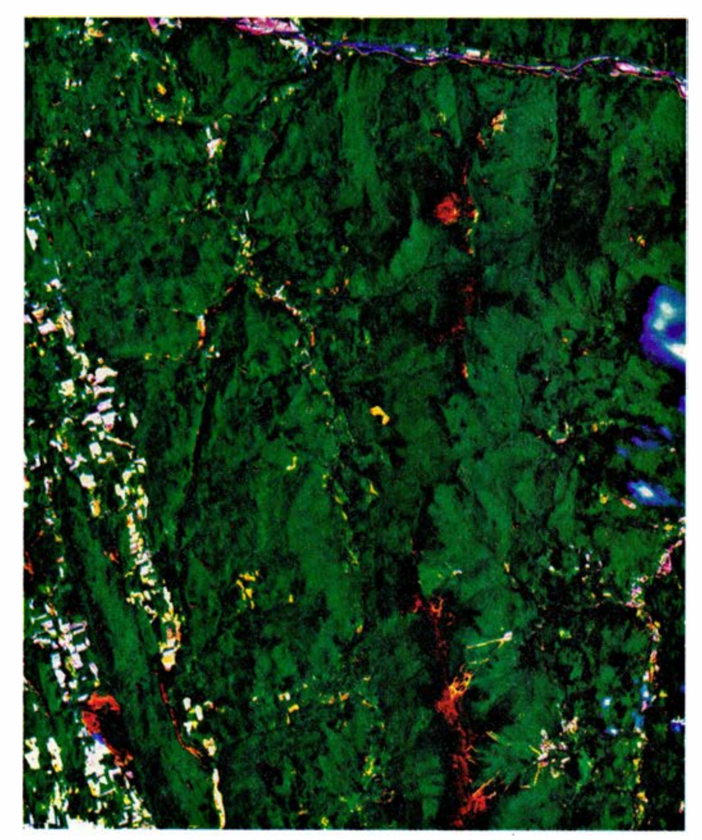
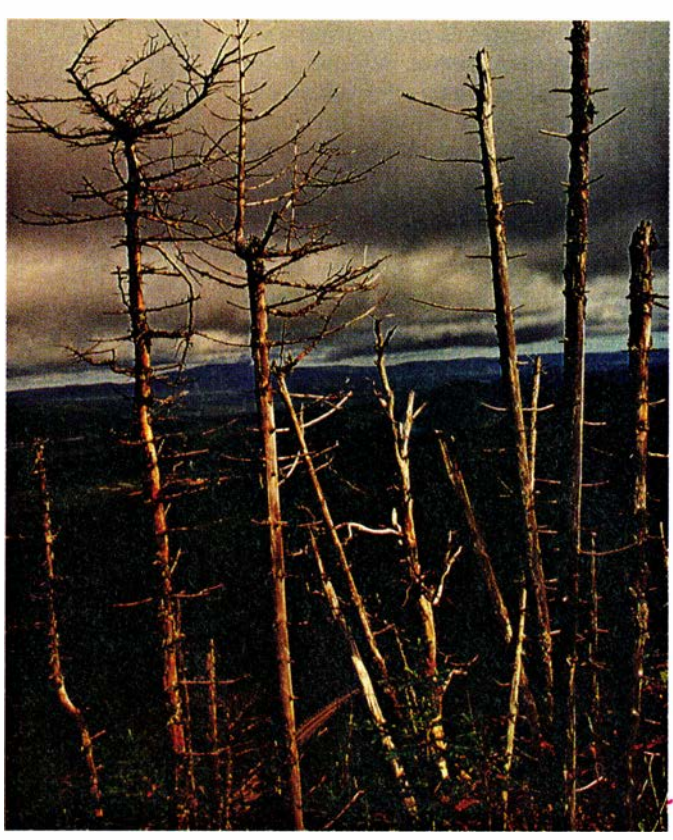
5. PROCESOS QUE OPERAN EN LA CUENCA HIDROLOGICA. Pueden modificar la química de la lluvia ácida antes de que alcance un lago o un río. La ilustración muestra los procesos que intervienen sobre el ácido sulfúrico en su infiltración a través de una ladera. El intercambio catiónico interviene si el suelo es rico en cationes (iones positivos), como el calcio y el magnesio (Ca^{2+} y Mg^{2+}, respectivamente). Esos iones son liberados a partir de ciertas rocas por la acción meteorizadora del agua subterránea o la precipitación cargada de dióxido de carbono disuelto, un proceso que también genera iones bicarbonato (HCO_3^-). Parte de los cationes de hidrógeno del ácido (*en color rojo*) desplazan el calcio y el magnesio y quedan a su vez retenidos en el suelo, donde el bicarbonato puede neutralizarlos. Estos procesos reducen la concentración de hidrogeniones —la acidez— del agua que alcanza el lago o el río. Asimismo, el ácido puede disolver las arcillas del suelo y liberar aluminio, elemento que puede causar daños en las plantas y la vida acuática.

Por último, la lluvia ácida podría reforzar la tensión provocada por las bajas temperaturas invernales. Es en otoño cuando las coníferas suelen prepararse para las gélidas temperaturas del invierno, extrayendo agua de las acículas: proceso que se conoce como endurecimiento por el frío. La señal inicial para el endurecimiento proviene, por lo común, de las raíces, en forma de un menguado abastecimiento de los nutrientes nitrogenados producidos por los microorganismos edáficos. Sin embargo, a medida que el ácido cala en las acículas, los compuestos de nitrógeno que contiene podrían fertilizar el árbol, anulando quizá la señal procedente de las raíces, con lo que se retrasaría el endurecimiento y el árbol quedaría a merced de los daños causados por la formación de hielo en los tejidos aciculares. Asimismo, el ozono podría debilitar la resistencia de un árbol a la congelación, al deteriorar las membranas celulares del follaje.

Se están realizando pruebas de laboratorio para averiguar qué mecanismos operarían en las condiciones de exposición a contaminantes característicos de los bosques afectados. Si es que interviene alguno. Sólo las investigaciones de campo en el propio bosque demostrarán qué mecanismo actúa realmente.

La tarea es todo un reto: se trata de averiguar el origen de lo que puede ser un incremento pequeño del estrés, superpuesto a un complicado conjunto de tensiones naturales. Ese telón de fondo varía de un bosque a otro, incluso de árbol a árbol.

El monte Whiteface, en las Adirondack, brinda un ejemplo muy pertinente a este respecto. Exhibe uno de los deterioros forestales más espectaculares de Estados Unidos; ahora bien, por predominar diversas tensiones naturales, sólo pueden sacarse conclusiones provisionales acerca del papel desempeñado por los contaminantes. La causa inmediata del decaimiento forestal, inferida a partir de los registros de los ingenieros forestales y los datos de temperatura, parece haber sido el daño reiterado y severo infringido por la desecación o la congelación durante los inviernos de los años iniciales de la década de los sesenta. El ozono podría haber aumentado la vulnerabilidad a los estragos de las heladas: las ramas que protegen del ozono ambiental presentan cambios bioquímicos que indi-

6. BOSQUES MUERTOS O MORIBUNDOS de las tierras altas de las montañas Green, en Vermont, aparecen teñidos en rojo en una imagen de satélite en falso color, tomada en la banda del infrarrojo que es sensible a la clorofila (*izquierda*). Una fotografía tomada en tierra, en el monte Whiteface, Nueva York, muestra la píceas muertas. Muchos investigadores creen que la lluvia ácida, quizás en combinación con otros contaminantes, es la causa del rápido decaimiento de algunos bosques de montaña en el este de Estados Unidos, si bien ese vínculo causal no ha podido probarse. La imagen de satélite, que procede del *Thematic Mapper* del Landsat, la proporcionó James E. Vogelmann, de la Universidad de New Hampshire; Ann Carey facilitó la fotografía de las píceas.

can que ese gas debilita al árbol por atacar las membranas de las células foliares. No se ha investigado todavía el papel de la lluvia y las nubes ácidas, pero es de presumir que intervendrán como una tensión de preparación más.

Aunque la participación de la lluvia ácida en la degradación de los bosques sea una incógnita, sus efectos en el suelo y en el agua no dejan lugar a dudas acerca de la necesidad de reducir la carga ambiental de compuestos de azufre y nitrógeno, y, por ende, de disminuir la acidez de la precipitación. Ya se han dado algunos pasos en esa dirección. En el noreste, la concentración de sulfato en la lluvia y la concentración de compuestos de azufre en el aire han disminuido durante los últimos quince años: esta disminución refleja las medidas de control de la contaminación establecidas por la Clean Air Act, promulgada en 1975, y las leyes complementarias sobre emisión aprobadas por los distintos estados. El ritmo de acidificación de los lagos del noreste también parece haber remitido. Sin embargo, para invertir la tendencia, la deposición ácida tendrá que menguar mucho más, y son numerosos los políticos y científicos que ahora se preguntan por la cuantía de la reducción y la velocidad de la misma.

Para dar respuesta precisa a ambas cuestiones necesitamos conocer hasta cuándo podrán seguir los procesos edáficos neutralizando o reteniendo ácidos en las regiones amenazadas y a qué velocidad pueden renovar los lagos su capacidad de neutralización de ácidos. Precisamos saber, asimismo, la relación entre la lluvia ácida y la degradación forestal. El informe del NAPAP, en 1990, debería venir en nuestro auxilio. Pero varios científicos se han adelantado y sugieren que, para proteger los lagos y ríos de las regiones más expuestas, como las Adirondack, habrá que reducir la deposición ácida a menos del 50 por ciento del nivel actual.

¿Dónde y cuánto habrá que recortar las emisiones para conseguir esa mengua de la deposición? Las directrices las fijarán dos imponentes modelos de ordenador —actualmente en fase de ensayo—, de la producción, transporte y deposición de los ácidos: el modelo regional de deposición ácida (abreviado en su denominación inglesa RADM), subvencionado por la Oficina de Defensa del Medio Ambiente, y el modelo de oxidantes y deposición ácida (ADOM en sus siglas inglesas), patrocinado por organismos gubernamentales de Canadá y la República Federal de Alemania. Los modelos incorporan todos los procesos quimioatmosféricos y meteorológicos que se sabe actúan sobre las moléculas portadoras de azufre, nitrógeno y carbono. (Se incluyen las de carbono por su mediación en la génesis de los oxidantes que transforman las emisiones de azufre y nitrógeno en ácidos.)

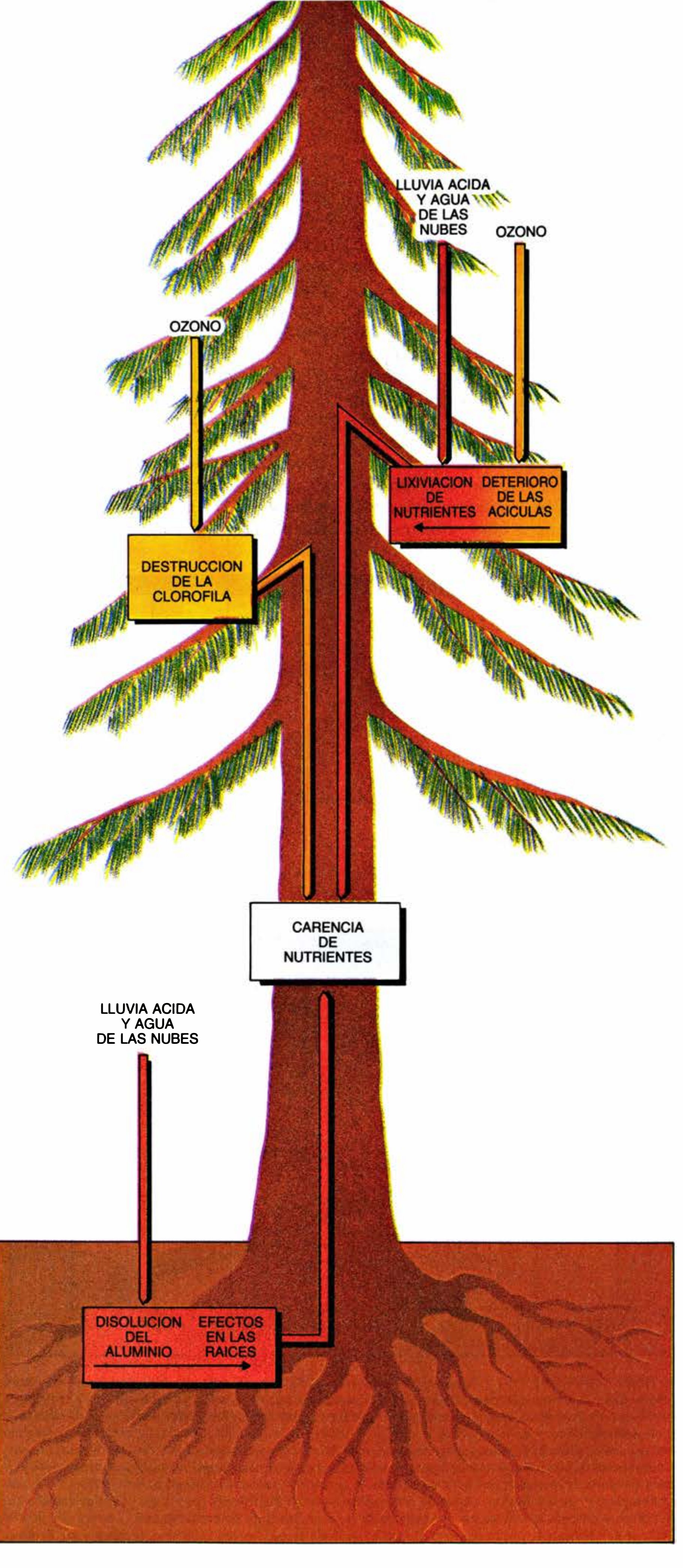
Dado un conjunto de localizaciones de origen, niveles de emisión y condiciones atmosféricas, estos modelos pueden pronosticar el estado del tiempo y la química atmosférica al objeto de predecir, con una resolución geográfica superior a 50 millas cuadradas, la cantidad de ácido depositada en toda una región, en el curso de un período de hasta cuatro días. Promediando los resultados calculados para diversas condiciones atmosféricas, los modelos pueden predecir, además, la pauta a largo plazo de la deposición para una determinada emisión, lo cual haría de ellos un instrumento inestimable para diseñar una estrategia de reducción de las emisiones.

¿Cómo se podría conseguir esta reducción? El modo más directo de controlar los contaminantes que provocan lluvia ácida sería el de quemar menos combustibles fósiles para transporte y generación de energía. Un transporte

público generalizado y unos automóviles más eficientes en cuanto a combustible pueden recortar el consumo de petróleo en el sector de los servicios, pero la generación de energía es de más difícil tratamiento. A pesar de las meritorias estrategias de ahorro energético, es probable que el consumo aumente a largo plazo, mientras que las actuales alternativas a las centrales eléctricas de combustibles fósiles no parecen prometedoras. Las centrales hidroeléctricas se encuentran limitadas por la escasez de emplazamientos adecuados, y las nucleares están acosadas por problemas económicos y una crisis de confianza del público en su seguridad.

Luego la clave para controlar la lluvia ácida ha de pasar por la reducción de las emisiones de las centrales eléctricas de combustibles fósiles, en particular las que queman carbón. El planteamiento que ya ha supuesto reducciones en la emisión de azufre en Estados Unidos, la República Federal de Alemania y Japón, combina la utilización de carbón de bajo contenido en azufre, o que ha sido tratado para eliminarlo al mismo tiempo que otros contaminantes, con la desulfurización de los gases de chimenea (FGD). En la FGD, se nebuliza caliza húmeda en los gases de escape calientes de la central, donde recoge hasta el 90 por ciento del dióxido de azufre. Sin embargo, puede resultar difícil deshacerse del residuo cargado de azufre; la propia FGD limita el rendimiento de una central eléctrica, haciendo que consuma una mayor cantidad de carbón para una producción dada. Además, el proceso no sirve en absoluto para rebajar las emisiones de óxido de nitrógeno.

Las centrales eléctricas de nueva tecnología, desarrolladas conjuntamente por el gobierno y la industria en el marco del Programa de Demostración del Carbón Limpio, aprobado en 1984, ofrecen una solución más ambiciosa. Hay tres técnicas de carbón limpio a punto de ensayarse en grandes centrales. En el sistema de combustión



7. OZONO Y LLUVIA ACIDA. Sumados, podrían acarrear una deficiencia de nutrientes en las coníferas, según la hipótesis en vigor acerca de su posible papel en la decadencia forestal. El ozono actuaría destruyendo la clorofila (esencial para la fotosíntesis) y degradando la envoltura cérea de las acículas. Acto seguido, la lluvia ácida o el agua de las nubes podría empapar más fácilmente el tejido acicular, y lixiviaría los nutrientes. En el suelo, el ácido podría mediar en la deficiencia de nutrientes al movilizar el aluminio, que desplazaría al calcio en los puntos de enlace de las raíces más finas del árbol. Debilitado por la falta de nutrientes, el árbol quedaría a merced de los insectos, las enfermedades y otros riesgos.

atmosférica en lecho fluidificado, un chorro de aire pone en suspensión un lecho turbulento de carbón y caliza pulverizados; la zona de combustión está surcada por los tubos que conducen el vapor hasta las turbinas de la central. La mezcla turbulenta de carbón y aire permite que la combustión discurra a una temperatura más baja y uniforme que en una caldera convencional, lo que reduce la formación de óxidos de nitrógeno. Por otro lado, la caliza secuestra eficazmente el dióxido de azufre. En la combustión presurizada en lecho fluidificado, técnica afín a la anterior, se quema carbón en aire a presión, con la mejora consiguiente del rendimiento de la central.

En la tercera técnica, ciclo combinado/gasificación, el carbón reacciona con vapor y aire a altas temperaturas para producir un gas compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. A continuación se quema el gas, lo que promueve la rotación de la turbina: el calor residual de los gases de escape de esa turbina sirve para generar vapor, que acciona una segunda turbina para producir una cantidad de electricidad suplementaria. Una central de este tipo rinde mucho más que otra convencional y emite menos óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre.

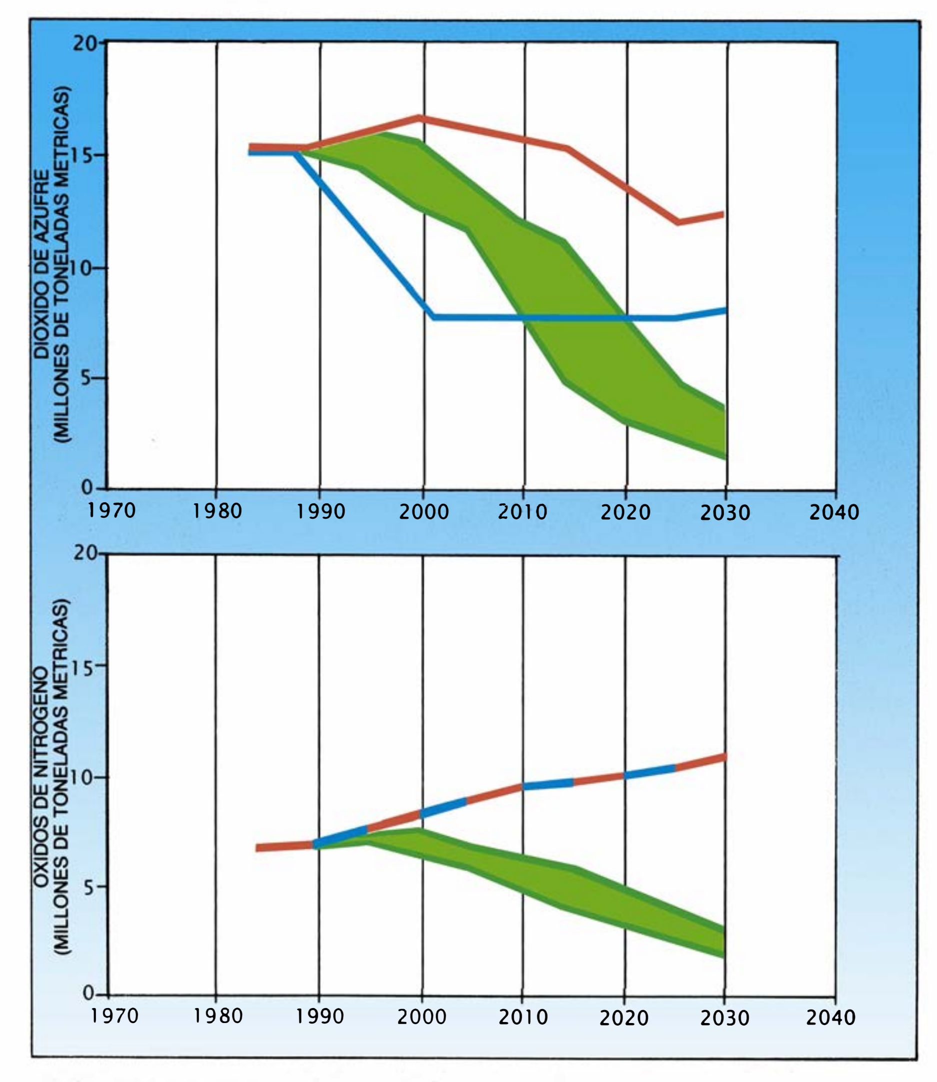
El reajuste de las centrales en servicio mediante la FGD ofrece la vía más rápida para limitar las emisiones de las centrales eléctricas. En Estados Unidos, casi la mitad de las centrales de carbón se construyeron con anterioridad a 1975, y no poseen ningún control para los contaminantes de azufre y nitrógeno. Concentradas en la mitad oriental del territorio, a ellas se deben la mayor parte de las emisiones de azufre del país. La incorporación de la FGD convencional podría recortar la emisión total de dióxido de azufre de las centrales eléctricas hasta menos de la mitad de su cifra actual, y ese recorte se podría conseguir en quince años. Así y todo, las emisiones de óxidos de nitrógeno no se verían afectadas. Además, las empresas de servicios públicos ponen reparos al gasto de instalación y funcionamiento del equipo de FGD y a la pérdida de rendimiento que entrañaría.

Las técnicas de carbón limpio ofrecen una posibilidad alternativa atrayente. Cualquier intento de controlar la lluvia ácida ha de apuntar a las centrales viejas, muchas de las cuales pronto serán candidatas al retiro o a la restauración. Reemplazarlas gradualmente por centrales convencionales equipadas con FGD sólo reportaría una modesta reducción de las emisiones; y el coste del proyecto, construcción y consecución de la aprobación reglamentaria para las nuevas centrales se dispararía. Sí cabe, en cambio, "reactivar" la mayoría de las centrales viejas —las 410 construidas entre 1955 y 1975—, restaurándolas con una unidad de combustión nueva que incorpore alguna de las técnicas de carbón limpio.

Una central reactivada podría conservar buena parte del equipo en uso para la manipulación del carbón y las cenizas, así como la infraestructura mecánica del ciclo del vapor y de generación de electricidad. La reactivación de una central en servicio sería, pues, rápida y barata en comparación con la construcción de otra nueva. Este planteamiento ofrece un atractivo adicional para las empresas de servicios públicos: la nueva maquinaria podría incorporarse en la central por módulos, lo cual permitiría a la planta acomodar su capacidad de producción a la demanda de energía.

Finalmente, la reactivación de las centrales viejas promete las mayores reducciones en la emisión de contaminantes, interesando a todo el abanico de los que están implicados en la lluvia ácida. Esta estrategia podría rebajar las emisiones de dióxido de azufre en más de un 80 por ciento, y las de óxido de nitrógeno en más de un 50 por ciento; la emisión de menos compuestos de nitrógeno restringiría, a su vez, la formación de ozono en la troposfera.

Hoy día sabemos que la expresión lluvia ácida engloba multitud de fenómenos. Los óxidos de nitrógeno, por



8. REDUCCION PREVISTA de las emisiones anuales de dióxido de azufre (*arriba*) y óxidos de nitrógeno (*abajo*) de las centrales eléctricas. Dicha caída varía según la opción tecnológica. El sustituir las centrales a los 50 años de funcionamiento por otras nuevas que incorporen la desulfurización de los gases de chimenea (FGD) reduciría sólo, y de forma lenta, el dióxido de azufre (*rojo*). El equipar todas las centrales en servicio con FGD, en un plazo de 15 años, provocaría una caída más drástica, aunque sólo del dióxido de azufre (*azul*). En ambos casos, la emisión de óxidos de nitrógeno iría en aumento a medida que se construyeran más centrales para satisfacer la demanda creciente de energía. Renovar las centrales construidas entre 1955 y 1975, con tecnología de "carbón limpio", como la combustión en lecho fluidificado (estrategia conocida como reactivación), brindaría a la larga los mayores recortes en ambos tipos de contaminante. Las franjas verdes ilustran el intervalo de reducción previsto en la hipótesis de que las centrales se renovaran a los 50 años.

ejemplo, influyen en el ciclo químico que convierte el dióxido de azufre en ácido sulfúrico; y el ozono que contribuyen a producir puede actuar de concierto con la lluvia ácida para destruir los bosques. El ion nitrato, así como la acidez que conlleva, puede afectar a los ecosistemas, no sólo en tierra firme, sino también, según parece, en las aguas litorales. La reducción de las emisiones prometida por la reactivación atemperaría tales efectos.

El inconveniente reside en la demora de la reducción esperada. Ello no obstante, la reciente disminución de las concentraciones de sulfato en el aire y la precipitación del noreste, así como el enlentecimiento de acidificación de los lagos, permiten abrigar cierta confianza. Probablemente, el país puede renunciar a la solución a corto plazo de reajustar los controles de la contaminación en las centrales en servicio, y favorecer la estrategia de la reactivación, aunque gradual, más global y económica. A pesar de todo, quizá sea necesaria todavía la intervención del gobierno, a través de un calendario de actuación, para acelerar el ritmo. Si las empresas se limitasen a reactivar las centrales a medida que se plantea la necesidad de ello —cuando llegan a sus 50 años de funcionamiento—, el proceso no concluiría hasta bien entrado el siglo XXI.

La tecnología ha saltado por encima de la ciencia, con una opción propia para afrontar el problema de la lluvia ácida, de obvio atractivo, sea cual fuere la solución que reciban las incógnitas que tiene planteada la ecología sobre el tema. La necesidad perentoria de reducir la interferencia humana en la compleja química de la biosfera queda ya dolorosamente comprobada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPECIAL ISSUE ON THE EXPERIMENTAL LAKES AREA. En *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science/Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 21, n.° 37, págs. 313-558; marzo de 1980.

ACID PRECIPITATION IN HISTORICAL PERSPECTIVE. Ellis B. Cowling en *Environmental Science and Technology*, vol. 16, n.° 2, págs. 110a-123a; febrero de 1982.

AIRBORNE CHEMICALS AND FOREST HEALTH. James N. Woodman y Ellis B. Cowling en *Environmental Science and Technology*, vol. 21, n.° 2, págs. 120-126, febrero de 1987.

La lluvia ácida en España

El fenómeno de la lluvia ácida no presenta en España la extensión e intensidad que alcanza en otras regiones de Europa y Norteamérica. Contribuye a ello la menor industrialización, la localización geográfica de la península Ibérica (en el límite de la influencia del cinturón de borrascas boreales), las características climáticas (clima mediterráneo, con un prolongado período de sequía estival, unido a una precipitación muy irregular de un año a otro) y la naturaleza del substrato geológico. Con todo, su incidencia en las zonas de mayor concentración industrial, o de mayor pluviometría, merece una consideración, por cuanto a escala local podría ser significativa y motivo de preocupación pública. Valga como ejemplo la reciente comparecencia ante los tribunales de una central eléctrica acusada de deterioro del medio ambiente a causa de la lluvia ácida.

Se denomina lluvia ácida a toda precipitación con un *p*H inferior a 5,6: *p*H que correspondería a unas condiciones preindustriales si sólo estuviera controlado por el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. Aunque no existe una red de recogida de datos que cubra todo el territorio, la información sobre la composición química de la precipitación en ciertas localidades de Cataluña demuestra que la lluvia ácida es un hecho en una de las áreas más industrializadas de España. F. Rodà, de la Universidad Autónoma de Barcelona, registra un *p*H medio ponderado de 4,7 para la lluvia en el macizo del Montseny (Barcelona); D. Bonilla, del mismo centro, señala un *p*H de 4,57 para la precipitación en el norte de la ciudad de Barcelona; A. Escarré y sus colegas, de la Universidad de Alicante, dan un *p*H medio ponderado de 4,4 para la lluvia en la sierra de Prades (Tarragona). Todos estos valores caen en el intervalo de los citados en la bibliografía para otras regiones más industrializadas: 4,07 en Alemania; 4,3 en Suecia; 4,14 en New Hampshire; 5,0 en California.

La composición química de la lluvia en ambas localidades catalanas (Montseny y Prades) se halla dominada por los iones sulfato (SO_4^{2-}) y calcio (Ca^{2+}). En promedio, las concentraciones de SO_4^{2-} [56 miliequivalentes por litro en el Montseny, 10,6 miliequivalentes por litro en Prades] y NO_3^- [20,4 miliequivalentes por litro en el Montseny, 12,42 miliequivalentes en Prades] son inferiores a las registradas en Europa central y Escandinavia. Los investigadores se han interesado por el origen de estos iones, dado su carácter potencialmente contaminante. A. Avila, de la Universidad Autónoma de Barcelona, utilizando de indicadores las razones SO_4^{2-}/Na^+, NO_3^-/Na^+, concluye que los iones sulfato y nitrato presentes en el agua de lluvia del Montseny son de origen no marino, y atribuye la fuente probable de los mismos a las emisiones antropogénicas. Pareja conclusión es aplicable a la precipitación de Prades (Carlos Gracia, de la Universidad Central de Barcelona, en comunicación personal).

Dada la proximidad geográfica de una y otra, en particular el Montseny, al importante núcleo urbano-industrial de Barcelona, justo será ponerlos en relación. Según el informe *Medio Ambiente en España, 1986*, publicado por la Dirección General del Medio Ambiente, la emisión anual de dióxido de azufre (SO_2) en Barcelona asciende a 33.476 toneladas, y la de óxidos de nitrógeno (NO_x), a 20.591 toneladas. Por su origen, el principal foco emisor de SO_2 es la combustión industrial (95,4 por ciento), mientras que en el caso del NO_x, el protagonismo se lo lleva el tráfico (73,2 por ciento), en particular los automóviles.

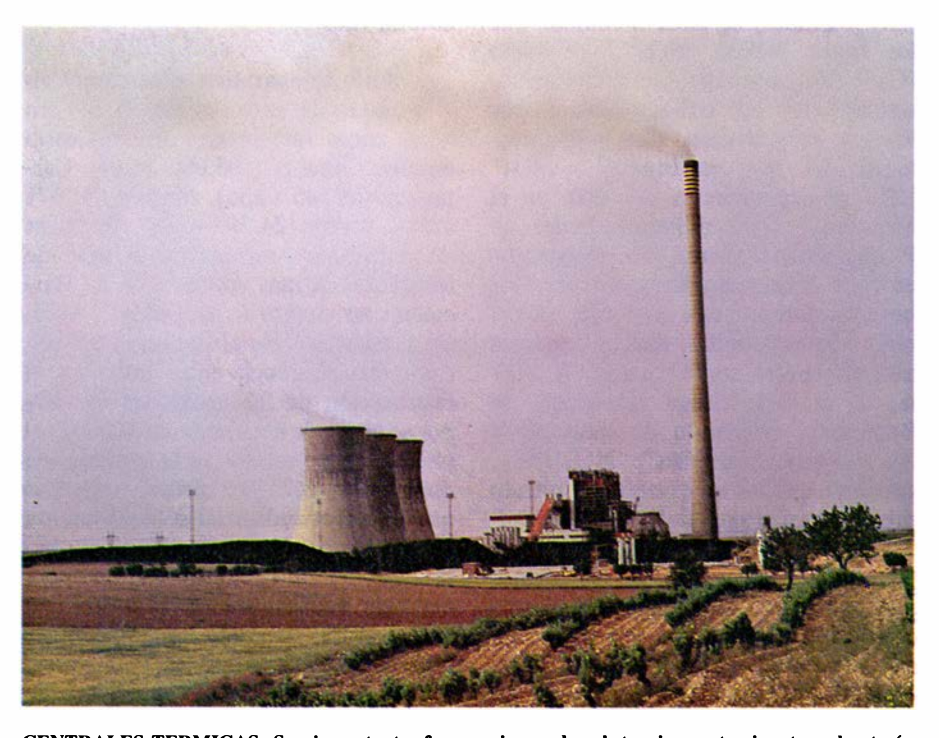
A título comparativo, ofrezcamos algunos datos de emisión de SO_2 en otras zonas industriales del territorio español: Huelva (105.000 t/año), Cartagena (80.545 t/año), Madrid (31.571 t/año), Avilés (24.280 t/año). De todas las localidades reseñadas, el área de Madrid es la más similar a la de Barcelona en cuanto a población y volumen industrial. No obstante, es de subrayar una diferencia entre ambas en la distribución de las emisiones de SO_2 por sectores de actividad: en Madrid, el principal foco emisor es la combustión doméstica (48,75 por ciento), mientras que el sector industrial sólo da cuenta del 39,34 por ciento. Posiblemente habría que buscar la explicación en el clima más continental de Madrid, con temperaturas invernales que hacen necesaria la calefacción doméstica.

Con todo, los efectos ecológicos de esas lluvias ácidas han sido inapreciables hasta el presente, tanto en los ecosistemas terrestres como en los acuáticos. Son esencialmente dos los procesos naturales que contribuyen a neutra-

lizar esa acidez. Escarré y sus colegas observan en las montañas de Prades una considerable neutralización del agua de translocación (la fracción de la lluvia total que atraviesa la cubierta vegetal y alcanza el suelo). Al ser Cataluña un país con claro predominio de los substratos calizos, ese efecto ha sido atribuido (C. Gracia, comunicación personal) a la naturaleza esencialmente carbonatada de las partículas que se depositan sobre la vegetación. En términos generales, dicha neutralización representa entre 0,09 y 0,6 unidades de *p*H. Como sería de esperar, no todas las especies vegetales tienen el mismo efecto neutralizador sobre el agua de translocación: en la encina y el madroño, de mayor superficie foliar, es más intenso que en el brezo o el pino, de hoja aciculiforme, muy estrecha.

A este proceso se suma la neutralización mediada por el intercambio catiónico durante la circulación del agua en el suelo. En la zona de estudio de Prades, los suelos son pardo-ácidos y se asientan sobre una roca madre constituida mayoritariamente por pizarras y areniscas pizarrosas, es decir, materiales con un claro predominio del cuarzo (75,6 por ciento de la composición química total). En general, los suelos de geología silicatada son mucho más sensibles a la acidificación que los carbonatados; así y todo, en el caso que nos ocupa, se trata de suelos profundos (70-150 cm), bien desarrollados y con una considerable capacidad de intercambio catiónico (12,11 a 34,43 meq/100 g, según la altitud). En estas condiciones, el efecto neutralizador del propio suelo, sumado al obtenido durante la translocación, eleva el *p*H de las aguas de avenamiento, que a la larga verterán en un río o un lago, de 4,4 a valores que oscilan entre 6,95 y 7,2, prácticamente neutros.

La combinación lluvia ácida-suelos silicatados es especialmente proclive a las secuelas ecológicas negativas. Desde esta perspectiva, D. Bonilla estudió la sensibilidad de los suelos del Montseny a la acidificación. Como medida de la sensibilidad, empleó la alcalinidad de las aguas de los arroyos y ríos, tomando como nivel de referencia arbitrario un valor igual o inferior a 0,2 miliequivalentes por litro. De su investigación llega a la conclusión según la cual las áreas más sensibles hay que buscarlas en zonas de litología silicatada (pizarras, esquistos y algunos tipos de granito), y a cierta altitud, que en el Montseny él concreta en los 1000 metros. Según Bonilla, el efecto de la altitud habría que atribuirlo a diversos factores: menor espesor del suelo, menor tiempo de contacto del agua con el substrato, disminución de la actividad biológica por efecto de la temperatura y, por tanto, menor presión parcial del CO_2, con la consiguiente merma de la meteorización química y la alcalinidad.



CENTRALES TERMICAS. Son importantes focos emisores de substancias contaminantes a la atmósfera. En particular, las centrales que queman carbones de alto contenido en azufre, como ésta de Andorra (Teruel), emiten anualmente decenas de miles de toneladas de dióxido de azufre. Las chimeneas elevadas permiten que los gases sean transportados a distancias considerables.

A la vista de esta conclusión, no cabe sino pensar de inmediato en los ríos y lagos del eje axial de los Pirineos, trabajados fundamentalmente sobre granitos y a altitudes entre 2200 y 2300 metros. ¿Están acidificados como tantos y tantos lagos de Escandinavia?

Los datos disponibles adolecen de cierta antigüedad (años 1974-1977). Por entonces, L. Campás y J. M. Vilaseca, a la sazón en la Universidad Central de Barcelona, efectuaron un reconocimiento extensivo de los lagos de la región pirenaica, estudiando sus características físico-químicas y biológicas. Sus datos no denotan indicio de acidificación en la época señalada. El *p*H de las aguas se situaba en el intervalo 6,4-8,5, coincidiendo los valores más bajos con la época de deshielo y dilución primaveral y los más altos con los períodos de mayor actividad fotosintética del fitoplancton. La alcalinidad, en cambio, era sistemáticamente baja –entre 0,02 y 0,44 meq/L–, lo cual los sitúa en la condición de muy sensibles a la acidificación. Con esta información en la mano y dado el tiempo transcurrido, ¿estarán acidificados en la actualidad? Algunos datos indican que la situación se ha mantenido estable, pero sería conveniente una confirmación plena, actualizando ese reconocimiento limnológico.

Así las cosas, nada parece indicar que en Cataluña –territorio español fuertemente industrializado– la lluvia ácida tenga hoy efectos ecológicos negativos. Con todo, los niveles de emisión de contaminantes atmosféricos –en particular, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno– son muy elevados. Con el ingreso en la Comunidad Económica Europea, España está obligada a adaptar sus emisiones a la normativa comunitaria; normativa que se concreta en pedir a sus miembros una reducción en las emisiones totales de SO_2 del 40 por ciento y el 60 por ciento, respecto de las correspondientes al año 1980, para los años 1993 y 1998. España, a quien se pide reducciones del 40 y el 50 por ciento, respectivamente, prevé, según el Plan Nacional Energético (PEN), reducciones del 26 por ciento para 1997 y del 37,7 por ciento para el año 2002. Según el PEN, para alcanzar este objetivo se actuará en dos direcciones. Se piensa, por un lado, en un mayor aprovechamiento de las energías renovables: solar, eólica, geotérmica y otras. Pero el grueso de las reducciones tendrá que llegar por la vía de la innovación tecnológica en las centrales eléctricas de combustibles fósiles. (Manuel Crespo Veigas.)

Fidelidad de la duplicación del ADN

Generación tras generación, a través de innumerables divisiones celulares, el ADN conserva escrupulosamente la información genética que portan los seres vivos. ¿Por qué se cometen tan pocos errores en su replicación?

Miroslav Radman y Robert Wagner

De César se cuenta que, en cierta ocasión, queriendo amnistiar a uno de sus oficiales, dictó la siguiente orden: "Liberadlo, no ejecutadlo". Su mensaje, sin embargo, se transmitió con un pequeño error: se cambió la coma. La orden que llegó al jefe de la guardia decía "Liberadlo no, ejecutadlo" y el infortunado perdió la vida.

La vida entera depende de la transmisión exacta de información. Y al pasar los mensajes genéticos por generaciones sucesivas de células, hasta las menores equivocaciones pueden constituir una amenaza para la vida. En los seres humanos la sustitución de una sola "letra" del mensaje genético es causa de enfermedades hereditarias tan letales como la anemia falciforme y la talasemia. Varios cánceres comunes están también asociados con la permuta de una letra.

En puridad, no todos los errores de la transmisión de los mensajes genéticos resultan catastróficos; algunas equivocaciones no tienen consecuencia y otras pueden ser incluso beneficiosas. Pero la mayor parte del mensaje debe conservarse y transmitirse con exactitud.

En los organismos de la complejidad del ser humano, alcanzar la necesaria exactitud constituye una auténtica proeza. El juego de instrucciones genéticas de los humanos mide aproximadamente tres mil millones de letras. Si la frecuencia de equivocaciones fuera sólo de una en un millón, se cometerían 3000 equivocaciones en cada duplicación del genoma humano. Puesto que el genoma se replica cerca de mil billones de veces en el curso de la construcción de un ser humano a partir del óvulo fecundado, es improbable que nuestro organismo pudiera tolerar tan alta tasa de error. En efecto, la tasa real de equivocaciones se acerca a una en diez mil millones. ¿Cómo alcanzan las células semejante fidelidad?

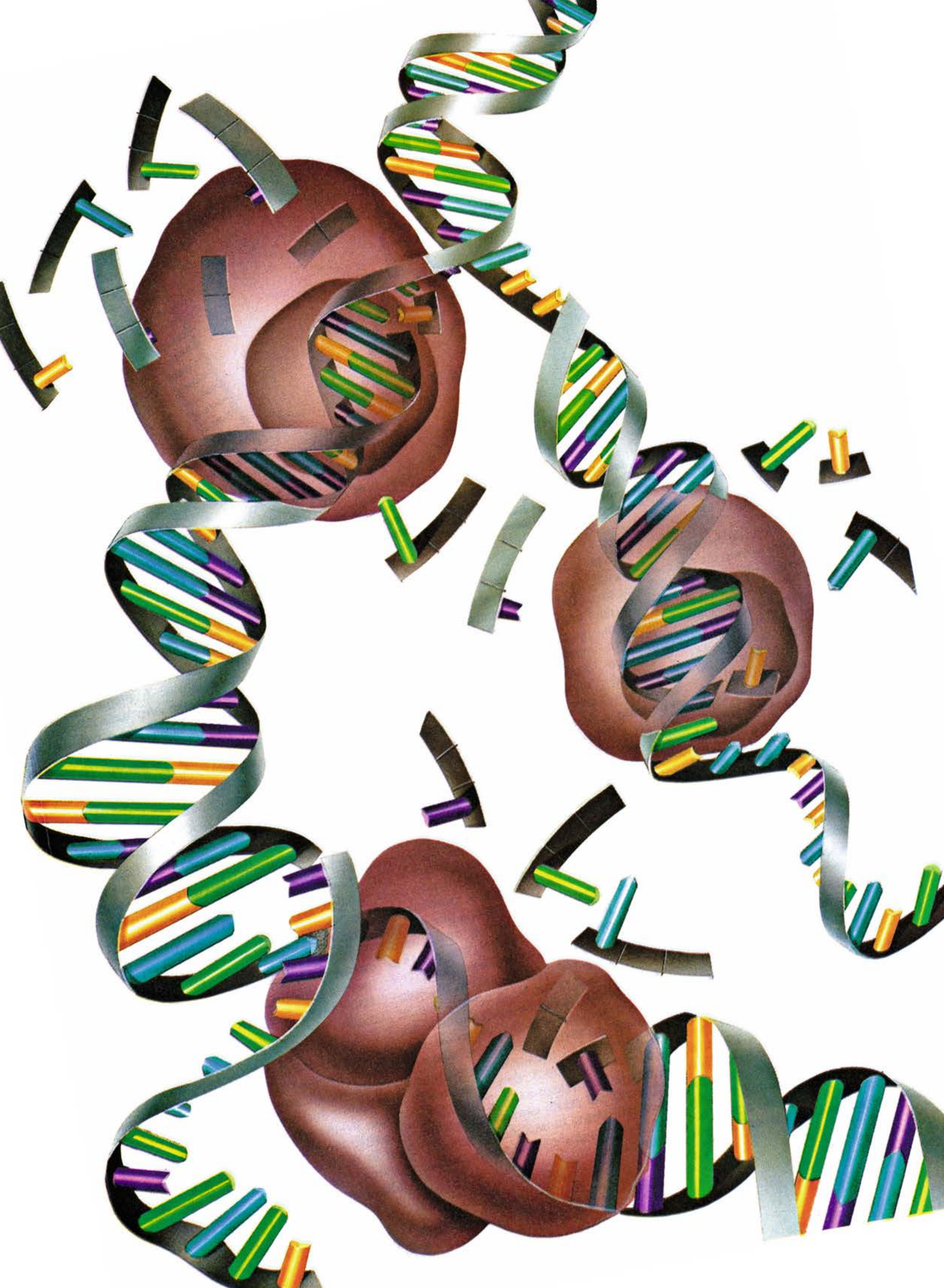
Pruebas derivadas de múltiples disciplinas han revelado que determinados procesos enzimáticos cooperan para asegurar la alta fidelidad de la replicación del ADN. Puede que la naturaleza haya desarrollado varios mecanismos complementarios por la sencilla razón de que un sistema, único y puntilloso, resultaría demasiado caro en tiempo y energía. También revisten interés los ocasionales errores que superan los mecanismos de control, pues las mutaciones constituyen una fuente importante de variación genética, necesaria para la flexibilidad adaptativa.

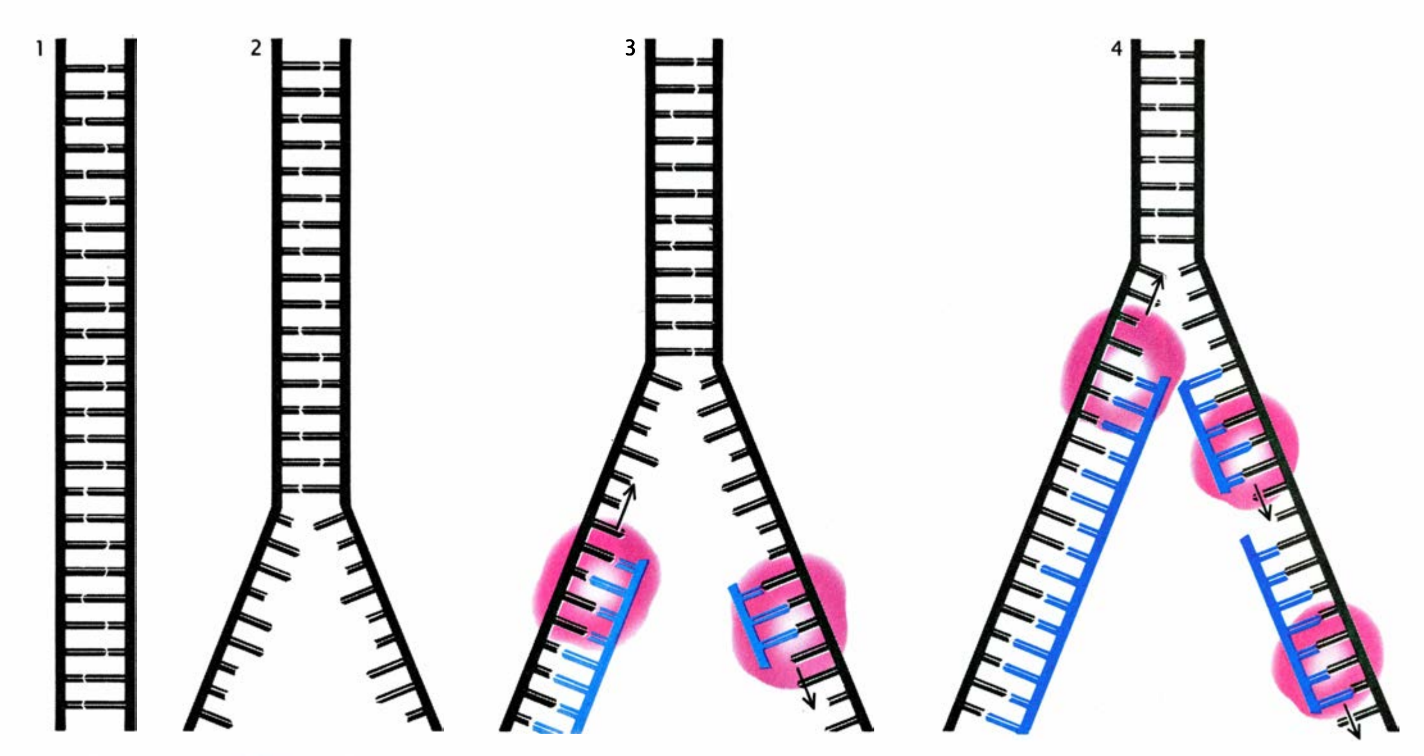
En las células de todos los organismos vivos, el mensaje genético se almacena en ADN bicatenario, cuya estructura resulta maravillosamente idónea para mantener la integridad de dicho mensaje. Las dos cadenas son complementarias, es decir, llevan la misma información genética, del mismo modo que el positivo y el negativo de una película cinematográfica representan la misma escena. Igual que las dos cintas de película, puede utilizarse una cadena de ADN para reconstruir la otra. Si se daña una hebra, puede repararse eliminando la región lesionada y usando la cadena indemne como molde de síntesis de una nueva cadena. El ADN se replica por un proceso similar: las dos cadenas originarias se separan y forman una "horquilla de replicación"; cada una sirve de molde para construir una cadena nueva [*véase la figura 2*].

Las "letras" bioquímicas que cifran la información del ADN son cuatro nucleótidos, que se distinguen unos de otros por las bases que contienen, a saber: adenina, guanina, timina y citosina, simbolizadas por sus iniciales *A, G, T* y *C*. El orden en el que se presentan los nucleótidos determina el "significado" del mensaje genético. Las bases

MIROSLAV RADMAN y ROBERT WAGNER han colaborado en numerosos proyectos de investigación y artículos científicos, si bien sus respectivas carreras han discurrido por sendas muy distintas. Radman es director de investigación del Centro Nacional francés de Investigación Científica (CNRS) en París. Nacido en Yugoslavia, se doctoró por la Universidad Libre de Bruselas en 1969. Tras una década de docencia en esa institución se incorporó al CNRS en 1983. Radman y Wagner coincidieron en 1972 en la Universidad de Harvard; el primero investigaba y el segundo era alumno de licenciatura del laboratorio de Matthew S. Meselson. Wagner se doctoró en 1976 y poco después dejó Harvard y se instaló en el campo. Cuatro años más tarde se trasladó a Bruselas a proseguir sus investigaciones con Radman. En 1981 volvió a los Estados Unidos y adquirió una granja de 150 hectáreas cerca de la frontera con Canadá, en el norte del estado de Nueva York, donde cría ovejas Suffolk de raza pura. Ocasionalmente, Wagner pasa varias semanas trabajando con Radman en su laboratorio de París.

1. REPLICACION DEL ADN, sujeta a tres mecanismos de "control de calidad", representados en este esquema por los tres complejos enzimáticos (*marrón*). Durante la replicación, las dos cadenas de la doble hélice parental se separan y actúan de molde de la síntesis de dos nuevas cadenas de ADN. Los nucleótidos de las cadenas nuevas (*barras de color*) deben ser complementarios de los nucleótidos de las viejas: los azules se emparejan con los púrpura y los verdes con los de color amarillo. El complejo enzimático de la parte superior izquierda está cribando nucleótidos para incorporarlos a la cadena en elongación. El de la derecha elimina un nucleótido incorrecto recién añadido a la cadena. El complejo de la parte inferior izquierda de la imagen repara el hueco donde se encontraba un fragmento con un nucleótido desemparejado.





2. HORQUILLA DE REPLICACION, donde la molécula de ADN bicatenario (*1*) se abre en cremallera para permitir el acceso de las herramientas moleculares (*2*). A las cadenas parentales expuestas se unen las enzimas biosintéticas, las denominadas polimerasas del ADN (*rojo*); procede entonces la síntesis de las dos cadenas nacientes (*azul*) en sentidos opuestos (*3*). La polimerasa de un lado avanza lentamente junto con la horquilla. En el otro, cerca de la horquilla se enlazan continuamente polimerasas, para sintetizar el fragmento de cadena comprendido entre la horquilla y el sitio donde entró la polimerasa anterior (*4*).

de una cadena se aparean con las de la otra cadena y unen las dos cadenas cual peldaños de una escalera. El apareamiento no ocurre al azar: la adenina debe aparearse con timina y, la guanina, con citosina. Esa complementaridad de las bases por parejas constituye el fundamento de la complementaridad de las cadenas de ADN.

Los errores que se registran durante la síntesis del ADN pueden dar lugar a la formación de parejas de bases no complementarias, es decir, a desemparejamientos. Determinadas condiciones del medio pueden propiciar la aparición de otras clases de errores. La reparación del daño infligido al ADN por el ambiente (sustancias químicas, radiaciones, etcétera) ha sido sometida a profundos estudios y revisiones [véase "Reparación inducible del ADN", por Paul Howard-Flanders; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1982]. Aquí sólo nos ocuparemos de los errores que surgen durante la replicación del ácido nucleico. Cuando se sintetiza ADN sin presencia de enzimas, tales errores afectan a una de cada 100 bases. Los sistemas enzimáticos que se analizan en este trabajo multiplican por 100 millones de veces la exactitd de la síntesis.

Tres procesos enzimáticos velan por la fidelidad de la replicación del ADN. El primero está relacionado con la selección del nucleótido que se añade a la cadena naciente. El segundo proceso pasa revista al nucleótido recién añadido y lo expulsa si no es el complementario. El tercer proceso tienen lugar tras la síntesis; consiste en la corrección de los errores que escaparon a los dos primeros "redactores". Al actuar la selección de nucleótidos y la corrección de pruebas (otra denominación del segundo paso) en concierto con la maquinaria de replicación del ADN, se consideran mecanismos de prevención de errores. El mecanismo que opera tras la síntesis, un mecanismo de corrección de errores, se llama reparación de desemparejamientos.

La exactitud de la replicación se debe principalmente a la eficacia de la selección de nucleótidos, proceso mediado por la misma enzima que efectúa la polimerización de los nucleótidos. La polimerasa del ADN, que esa es la enzima, avanza a lo largo del ADN molde y sintetiza la cadena complementaria a partir de la reserva celular de nucleótidos. Los nucleótidos libres se encuentran en forma de trifosfatos: llevan una ristra de tres grupos fosfato. Para añadirse a la cadena en crecimiento, los nucleótidos deben escindirse hasta la forma de monofosfatos. La polimerasa del ADN captura un nucleótido trifosfato, lo escinde a monofosfato y lo agrega al extremo de la cadena naciente.

La selección del nucleótido se basa en las relaciones energéticas que se establecen entre reacciones que compiten; en otras palabras: frente a una base puede disponerse otra base cuaquiera, pero el emparejamiento correcto es el que resulta energéticamente más favorable. Según sugieren las pruebas, la selección del nucleótido actúa tanto en la etapa de unión del trifosfato como en la de incorporación del monofosfato [*véase la figura 3*]. En ese sentido, y en el caso de la captura del trifosfato, los resultados de los experimentos realizados por Nancy Nossal, del Instituto Nacional de Artritis, Diabetes y Enfermedades Digestivas y Renales, y David Korn, de la facultad de medicina de la Universidad de Stanford, han demostrado que el complejo formado por la polimerasa, el ADN molde y el nucleótido trifosfato alcanza su estabilidad máxima cuando el trifosfato es complementario del nucleótido molde.

La selección en la etapa de la incorporación del monofosfato probablemente sea más rigurosa que la que se realiza durante la captura del trifosfato. Un modelo basado en trabajos de nuestro laboratorio (ubicado entonces en la Universidad Libre de Bruselas) postula que la mayoría de los nucleótidos que captura la polimerasa atravie-

san el filtro de la fase de trifosfato; esto es, logran escindirse a monofosfato y alinearse con la hebra molde. Si el nucleótido es complementario, se ajusta bien a la base del molde y su adición se estabiliza; cuando no lo es, no acaba de encajar, se invierte la reacción y el nucleótido recupera su forma trifosfatada. Si se nos permite la comparación, la polimerasa sería como el cocinero ciego que toma los ingredientes al azar, saborea cada uno y decide si lo vierte en la sopa o lo devuelve a la alacena.

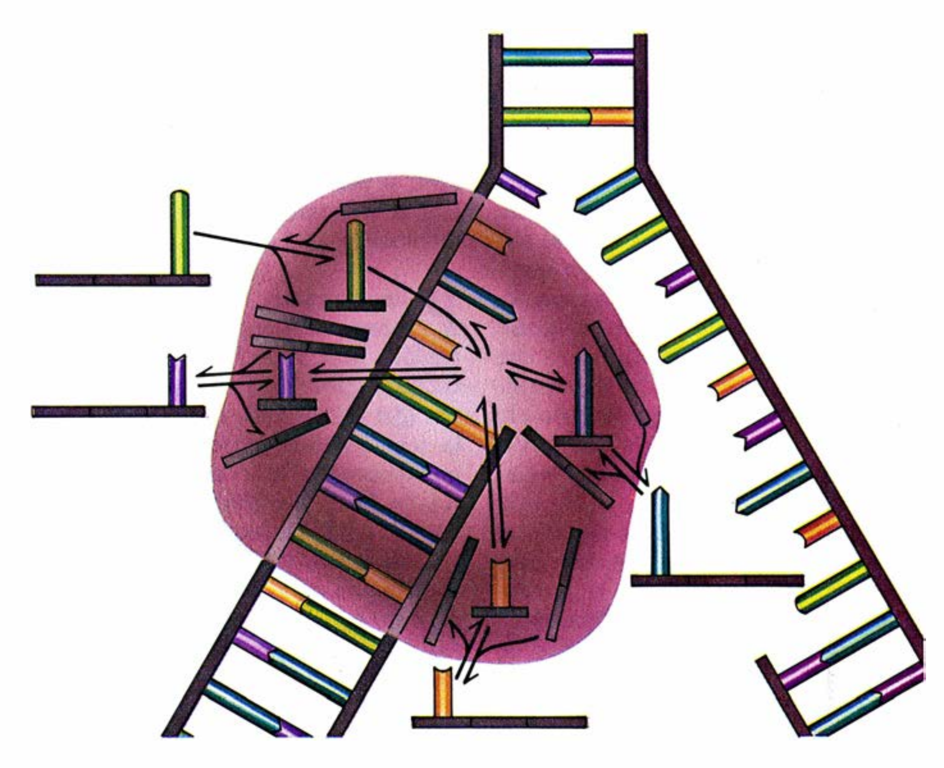
En la etapa de la selección del nucleótido, los que no son complementarios se incorporan al ritmo de uno por cada 100.000, aproximadamente. Los errores que logren superar ese filtro se toparán con el segundo mecanismo de prevención: la corrección de pruebas, proceso que corre a cargo de una actividad enzimática propia de la polimerasa del ADN, o asociada a ella, y que Douglas L. Brutlag y Arthur Kornberg, investigadores de Stanford y sus descubridores a comienzos de los años setenta, apodaron "exonucleasa de corrección de pruebas". La exonucleasa está dotada para eliminar, del extremo de la cadena naciente, los nucleótidos complementarios y los que no lo son. Sin embargo, por regla general, únicamente se le ofrece la oportunidad de actuar cuando el nucleótido no es complementario. La presencia del nucleótido desemparejado detiene la adición del siguiente nucleótido; durante esa forzada pausa del proceso de polimerización, la exonucleasa tiene tiempo de eliminar el nucleótido desemparejado. Entonces, la polimerasa trata de nuevo de encontrar el nucleótido adecuado para la posición terminal.

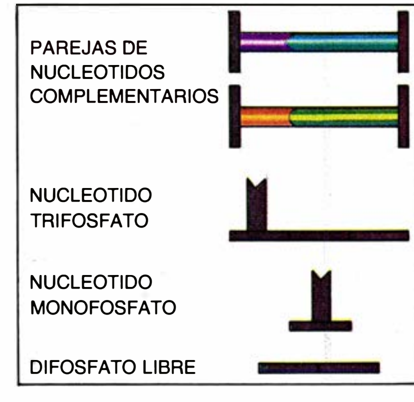
En circunstancias normales, la combinación de selección del nucleótido y de corrección de pruebas por la exonucleasa limita los errores, dejándolos en uno por cada 10 millones de pares de bases. Pero los dos mecanismos de prevención de errores pueden resentirse si la reserva de trifosfatos que abastece de materias primas al proceso de síntesis contiene proporciones desiguales de los cuatro nucleótidos. A comienzos de la década de 1980, Alan R. Fersht y sus colegas, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología, de Londres, descubrieron que la tasa de errores de una posición determinada de la cadena naciente de ADN resultaba directamente proporcional a la concentración de nucleótidos no complementarios del molde, así como a la del nucleótido complementario de la base siguiente de la cadena molde. Resulta lógico, pues, que, cuando es alta la concentración de nucleótidos no complementarios de los del molde, aumente la probabilidad de desemparejamiento, y que una concentración elevada del nucleótido complementario del nucleótido de la posición siguiente de la cadena molde acelere la reacción de polimerización y acorte el tiempo del que dispone la exonucleasa para actuar. Por consiguiente, las reservas intracelulares de nucleótidos deben estar sujetas a un delicado equilibrio.

Los mecanismos de prevención de errores son reacciones enzimáticas normales en las que los resultados más favorables, desde el punto de vista energético, prevalecen sobre aquellos que presentan menor estabilidad. La corrección de errores resulta algo más complicada. Para corregir un desemparejamiento en un ADN recién sintetizado, la maquinaria enzimática debe ser capaz de detectar y eliminar el nucleótido mal emparejado, así como de regenerar la secuencia correcta.

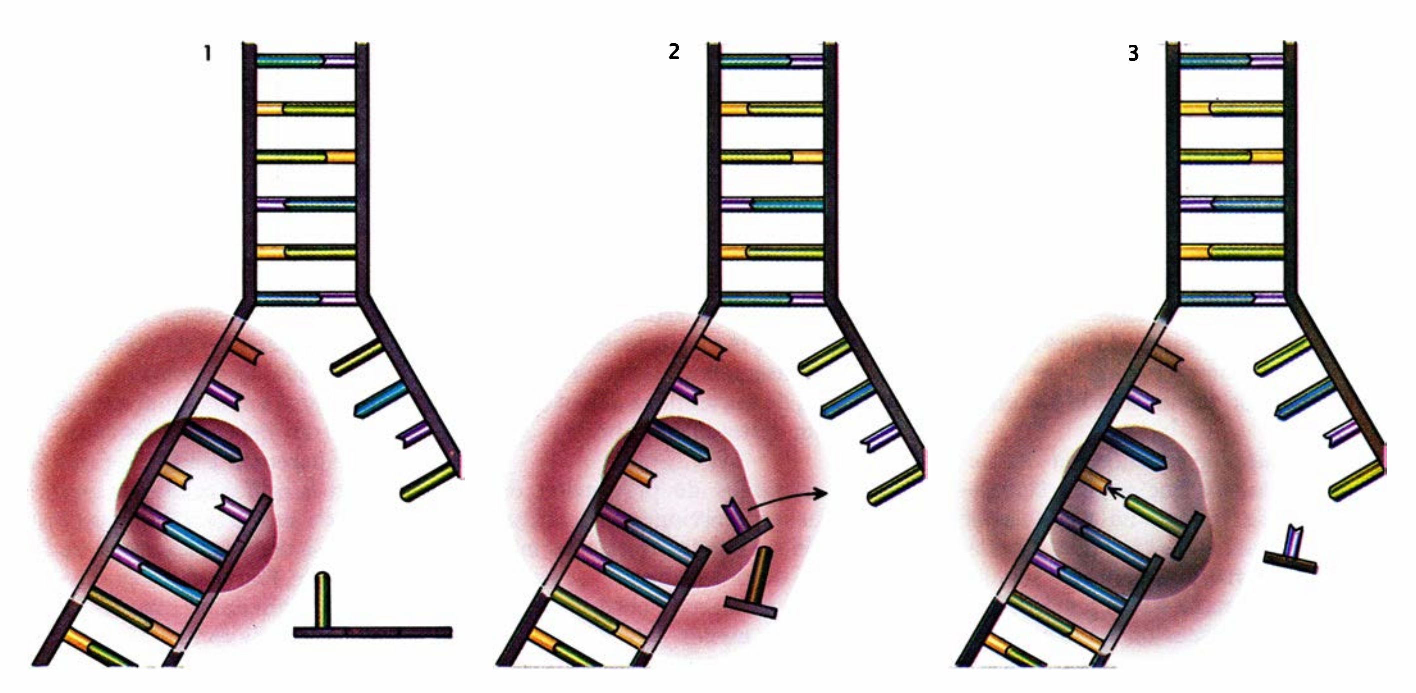
Robin Holliday, del Consejo de Investigaciones Médicas, de Londres, postuló, hace casi 25 años, la existencia de tal reparación de desemparejamientos. Durante mucho tiempo, los biólogos moleculares se preguntaron cómo podría distinguir el sistema de reparación la cadena parental de ADN de la recién sintetizada. Se suponía necesaria esa distinción para eliminar el miembro no parental del desemparejamiento y conservar el parental. En 1975, durante una reunión científica celebrada en Escocia, uno de nosotros (Radman) comentó con Matthew S. Meselson, de la Universidad de Harvard, el problema de la identificación de las cadenas. Meselson apostilló: "Si yo fuera la enzima de reparar emparejamientos, me fijaría en la metilación del ADN que sigue a la replicación".

Meselson se refería al proceso por el





3. SELECCION DE NUCLEOTIDOS. Evita la incorporación de nucleótidos no complementarios a la cadena en crecimiento. La polimerasa del ADN (*en color marrón*) que lleva a cabo la síntesis interviene también en la selección de nucleótidos. El proceso de síntesis comprende dos etapas: en primer lugar se escinde a monofosfato la forma trifosfatada del nucleótido; a continuación, el monofosfato se agrega a un extremo de la nueva cadena. Los autores del artículo creen que la selección actúa en ambas etapas mediante vías químicas reversibles (*flechas dobles*). Cuando la polimerasa captura un nucleótido que no es complementario del que porta el filamento molde, se rechaza antes de que se enlace a la cadena.



4. "CORRECCION DE PRUEBAS" a cargo de una enzima dotada de actividad exonucleasa asociada a la polimerasa. La exonucleasa tiende a eliminar cualquier nucleótido que acabe de añadirse a la cadena. Cuando un desemparejamiento en la posición terminal de la hebra retrasa la incorporación del nucleótido siguiente (*1*), la exonucleasa tiene tiempo de actuar y retira el nucleótido (*2*). La polimerasa repite entonces la búsqueda de la pareja adecuada (*3*).

cual las cadenas de ADN recién sintetizadas se marcan con grupos metilo. En algunas bacterias, los grupos metilo se unen al nucleótido de adenina de todas las secuencias *GATC*. Tales bacterias conocen un breve intervalo temporal durante el cual las nuevas secuencias *GATC* permanecen sin metilar. Durante ese período, la cadena parental y la nueva difieren en el grado de metilación. Meselson consideró que las enzimas de reparación de desemparejamientos podrían aprovechar ese lapso para servirse de la diferencia transitoria entre cadenas jóvenes y viejas.

En 1976, los dos autores nos reunimos en el laboratorio de Meselson para comprobar la hipótesis de la metilación. Los resultados de nuestros experimentos sugerían que la reparación de desemparejamientos se realizaba preferencialmente en las cadenas de ADN sin metilar. Entre 1980 y 1985, Christiane Dohet, de nuestro laboratorio de París, y los colaboradores de Meselson, en Harvard, realizaron una serie de experimentos que confirmaron y ampliaron los resultados de aquella investigación. Construyeron heterodúplices que contenían parejas incorrectas y los introdujeron en varios mutantes de *Escherichia coli*. (Llámase heterodúplex a la molécula de ADN cuyas dos cadenas no portan la misma información, debido a desemparejamientos, deleciones, inserciones u otros daños.) Encontraron que, cuando sólo una de las cadenas del heterodúplex con desemparejamientos está completamente metilada, la reparación se produce exclusivamente sobre la cadena sin metilar; si todas las secuencias *GATC* de ambas cadenas están metiladas, no hay reparación.

Posteriormente, nuestros colegas Françoise Langle-Rouault y Geneviève Maenhaut-Michel, de la Universidad Libre de Bruselas, demostraron que la secuencia *GATC* que dirige la reparación de desemparejamientos podía encontrarse a varios miles de pares de bases del sitio del error. Más aún, el ADN sin secuencias *GATC* resultaba tan refractario a la reparación como aquel cuyas secuencias *GATC* se encontraran enteramente metiladas. Los mismos investigadores encontraron también que la ruptura de una cadena del heterodúplex podía desempeñar la misma función que las secuencias *GATC* no metiladas.

Langle-Rouault y Maenhaut-Michel descubrieron que la estirpe *mutH* de *E.coli*, uno de los cuatro mutantes de esa bacteria que tienen afectada la capacidad de reparación de desemparejamientos, sí corregía tales heterodúplices. (Las otras tres estirpes son *mutL*, *mutS* y *mutU*.) Por esa deficiencia de la reparación de desemparejamientos, algunas de las estirpes mutan frecuentemente. Según se ha comprobado, cada cepa bacteriana carece de una función proteica implicada en la reparación de desemparejamientos. Las proteínas se designan por las mismas letras que los mutantes pertinentes.

Los resultados de Langle-Rouault y Maenhaut-Michel sugieren que, cuando debe repararse, la cadena de ADN se corta en un sitio *GATC* no metilado, tarea que corre a cargo de la enzima MutH. Sus conclusiones, y las obtenidas en nuestro trabajo anterior *in vivo*, han sido confirmadas recientemente por Paul Modrich y sus colegas, del Hospital Clínico de la Universidad de Duke, quienes diseñaron un ingenioso ensayo para medir la actividad de reparación de desemparejamientos *in vitro*. Con esta prueba, Modrich y sus colegas demostraron que MutH era la enzima que cortaba el ADN; prosiguieron los estudios hasta caracterizar las demás proteínas Mut. Se sabe que MutS es la proteína que se une a la pareja incorrecta; MutL parece implicada también en el reconocimiento del desemparejamiento y, MutU, separa las dos cadenas de la doble hélice, un paso manifiestamente necesario para que se produzca la reparación. La investigación de Modrich reveló, asimismo, que para corregir los desemparejamientos se precisaba otra proteína, que se une a las cadenas sencillas de ADN. Según parece, ese polipéptido, que también interviene en la replicación del ADN, protege y estabiliza las cadenas no emparejadas para que permanezcan accesibles a la polimerasa.

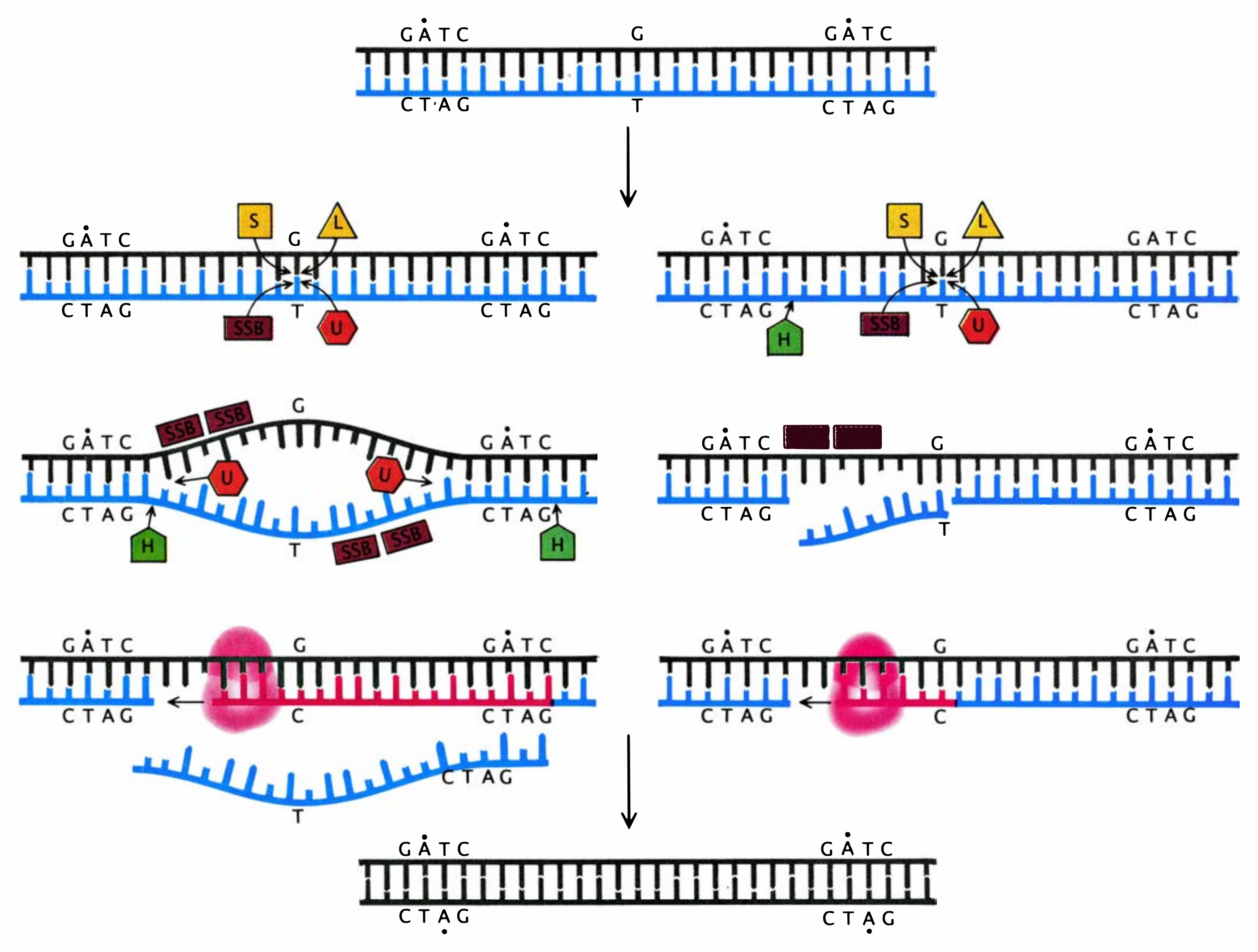
No conocemos todavía, con los por-

menores necesarios, el sistema de reparar desemparejamientos de *E.coli*. Ello no obstante, contamos ya con dos modelos para explicar su funcionamiento [*véase la figura 5*]. Ambos proponen que la proteína MutS, y quizá MutL, participan en el reconocimiento de las parejas incorrectas, y ambos postulan que existe algún medio de comunicación a larga distancia entre el desemparejamiento y las secuencias *GATC* no metiladas de la cadena nueva, que MutU abre la doble hélice y que se desecha la zona que contiene el desemparejamiento. Se cree que la proteína que se une al ADN monocatenario protege el molde así expuesto hasta que la polimerasa del ADN reconstruya una cadena complementaria que ocupe el hueco.

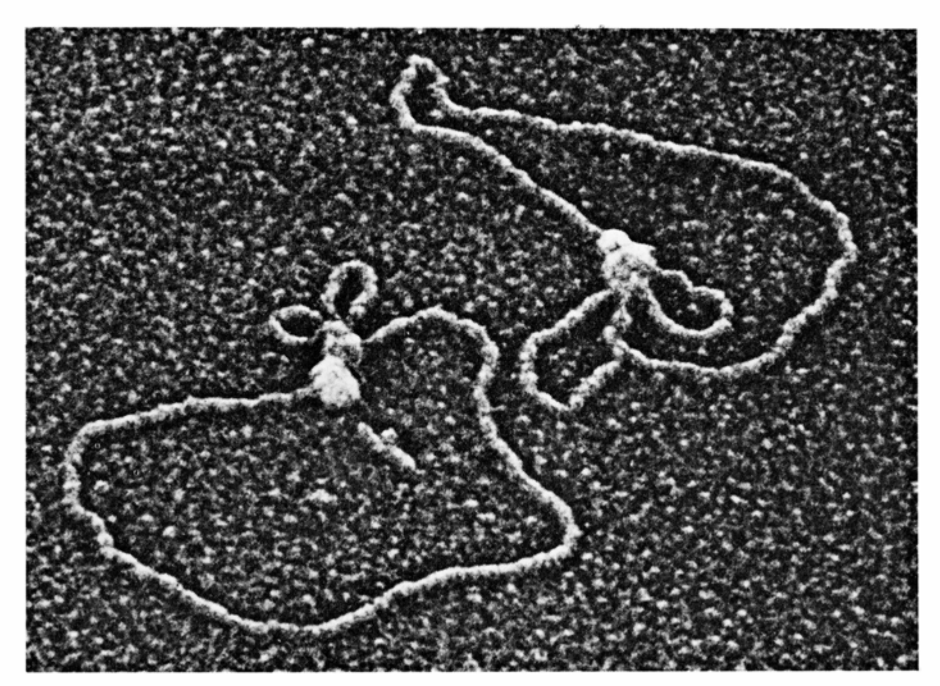
La principal diferencia entre los dos modelos se refiere a los sitios por donde corta la proteína MutH. De acuerdo con una de las hipótesis, la ruptura se produce en los dos sitios *GATC* que flanquean el desemparejamiento; según la otra, el corte ocurre en la propia pareja incorrecta y en una secuencia *GATC* adyacente. El primer modelo supone también que MutH corta el ADN una vez separadas las cadenas, mientras que el segundo predice que MutH corta antes de dicha división. Ambas hipótesis se encuentran hoy sometidas a comprobación, y los datos de que disponemos no nos permiten optar por una u otra.

Los estudios realizados en los últimos años han aportado cierto conocimiento de los tipos de desemparejamientos que este mecanismo de reparación corrige. En nuestro laboratorio, y en el dirigido por Hans Joachim Fritz, del Instituto Max Planck de Bioquímica de Munich, los estudios se centraron sobre *E. coli*; los grupos encabezados por Michel Sicard y Jean-Pierre Claverys, de la Universidad de Toulouse, y por Sandford A. Lack, del Laboratorio Nacional Brookhaven, investigaron la reparación de desemparejamientos en los pneumococos. Según esos trabajos, no todos los errores se reparan con la misma eficacia. Antes bien, parece que las faltas se reparan más frecuentemente si no alteran la doble hélice. En otras palabras, si un desemparejamiento modifica la estructura helicoidal, no lo detectará probablemente la maquinaria de reparación de parejas incorrectas. Tales errores son irrevocables.

Parece, por fortuna, que los mecanismos de prevención de errores orillan a la perfección la clase de equivocacio-



5. MECANISMO DE REPARACION DE DESEMPAREJAMIENTOS; corrige los errores después de haberse sintetizado la cadena de ADN. Se han propuesto dos modelos. En ambos, las proteínas MutL y MutS interactúan con la pareja incorrecta (*G-T*), y otra, la proteína MutH, corta la cadena recién sintetizada. El aparato de reparación distingue la cadena parental de la nueva gracias a los grupos metilo (*puntos negros*) de las secuencias paternas *GATC*. En la zona que rodea el desemparejamiento, las cadenas se separan por acción de MutU; una proteína afín al ADN monocatenario, la *SSB*, estabiliza la separación. La principal diferencia entre ambos modelos de reparación de desemparejamientos se refiere a los sitios de corte de la cadena que contiene el nucleótido incorrecto: uno la ubica en las dos secuencias *GATC* que lo flanquean (*izquierda*) y, el otro, en una secuencia *GATC* y en el propio desemparejamiento (*derecha*). En ambos casos, las polimerasas sintetizan un segmento nuevo en lugar del escindido y la cadena corregida acaba metilándose igual que la copia parental.



6. COMIENZO DE LA REPLICACION en moléculas anulares de ADN de un virus bacteriano. En los lugares donde los lazos parecen anudarse, para empezar el proceso de copia se colocan complejos proteicos de replicación de *Escherichia coli* (aumentados 50.000 veces en la imagen que se muestra). La micrografía fue obtenida por Jack D. Griffith de la facultad de medicina de la Universidad de Carolina del Norte.

nes que la reparación de desemparejamientos no "ve". Algunas parejas de nucleótidos causan distorsiones con más facilidad que otras; presumiblemente, la selección de nucleótidos procura evitar en lo posible los desemparejamientos que provocan la máxima disrupción de la estructura de la hélice y del apilamiento de las bases (precisamente los desemparejamientos que el sistema de reparación reconoce con dificultad). La exonucleasa de corrección de pruebas interviene con mayor eficacia, así parece, en aquellos casos en los que la reparación de desemparejamientos es más inepta.

La mayor parte de lo que se sabe sobre los mecanismos de fidelísima replicación del ADN procede de experimentos realizados con bacterias. ¿Hasta qué punto pueden aplicarse esos conocimientos a organismos más complejos? Probablemente los dos mecanismos de prevención de errores sean comunes a casi todos los organismos, en los que funcionarían, en lo fundamental, del mismo modo. Se dispone de abundantes datos en el sentido de que se reparan los desemparejamientos en levaduras, hongos y moscas del vinagre, así como en ranas y mamíferos. Sin embargo, la mayor parte de esas pruebas no se refieren a errores que aparecen durante la replicación, si no en el curso de la recombinación genética, proceso en el cual intercambian cadenas de ADN moléculas de orígenes distintos [véase "Recombinación genética", por Franklin W. Stahl; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987].

Algo queda claro: puesto que las secuencias *GATC* sólo aparecen metiladas en un puñado de especies bacterianas, la reparación de desemparejamientos no puede estar dirigida, en la mayoría de los organismos, por la metilación de esas secuencias. No se ha detectado metilación en cromosomas de levadura ni de la mosca del vinagre; en las células de mamífero, suele metilarse la citosina en vez de la adenina, metilación que parece estar implicada en la regulación de los genes. ¿Cómo distinguen, pues, las células de los organismos superiores, las cadenas nuevas de las viejas?

En nuestra opinión, esa pregunta admite dos respuestas. Se basa la primera en la síntesis de ADN, inicialmente discontinua en los organismos superiores: las cadenas recién sintetizadas contienen cortes transitorios que permiten distinguir las cadenas recién sintetizadas de las viejas y que podrían constituir un punto de partida para la eliminación de segmentos mal emparejados, del mismo modo que el corte supliría la actividad de escisión que realiza la proteína MutH en *E. coli*. La polimerasa rellenaría el hueco resultante.

Una posibilidad alternativa, sugerida por Philip J. Hastings, de la Universidad de Alberta, y por nosotros, es que en los organismos superiores la reparación de desemparejamientos se base en la recombinación genética. Las dos "cromátidas hermanas" que salen de la horquilla de replicación presentan secuencias de nucleótidos idénticas, por lo que las cadenas de una de las cromátidas pueden servir de moldes para reconstruir la otra. En este caso, el sistema de reparación no precisa distinguir las cadenas parentales de las recién sintetizadas; ante un desemparejamiento, se escindirían ambas cadenas de la doble hélice. Las cadenas rotas interactuarían con las de la región homóloga de la cromátida hermana; y estas cadenas dirigirían entonces la reparación de las cadenas rotas.

Los resultados de experimentos realizados en nuestro laboratorio y los trabajos de Kendric Smith, de Stanford, indican que, en *E. coli*, la reparación no dirigida de desemparejamientos puede producir cortes bicatenarios; Jack W. Szostak, de la facultad de medicina de Harvard, y Franklin W. Stahl, de la Universidad de Oregón, y sus colegas han demostrado que esos cortes se pueden reparar por recombinación. Si en los organismos superiores ocurriera un proceso semejante, tendríamos la explicación de la recombinación espontánea entre cromátidas hermanas que se observa frecuentemente en ellos. Empero, el modelo presenta una dificultad: puesto que las células de mamíferos contienen múltiples copias de algunas secuencias de ADN, hay un riesgo alto de que las cadenas cortadas se recombinen incorrectamente. Quizás el proceso de empaquetamiento del ADN, la cromatinización, limite la reparación por recombinación a una pequeña zona adyacente a la horquilla de replicación.

Maravilla la exactitud de la replicación del ADN que ofrecen los mecanismos de prevención y de corrección de errores. Pero podría mejorarse. En *E. coli*, por ejemplo, sólo unas pocas docenas de proteínas por célula se dedican a reparar desemparejamientos. ¿Por qué no hay más? ¿Por qué es tan breve el intervalo durante el que puede operar la reparación de desemparejamientos, lapso cuya duración depende de la tasa de metilación?

Las enzimas que reparan desemparejamientos podían cometer errores, y en ese caso aumentar su presencia o dejarles más tiempo para actuar no mejoraría la exactitud de la replicación. Podría ocurrir también que la reparación de desemparejamientos resultara

muy costosa, hasta el punto de que la célula no pueda permitirse mantener más que unas pocas docenas de complejos de reparación.

Recuérdese también que los errores no siempre perjudican la salud del organismo. Si la orden de César hubiera sido "Ejecutadlo, no liberadlo", la coma mal puesta habría salvado una vida. En ciertas condiciones, el futuro de una población puede depender de la capacidad de los individuos que la constituyen para mutar y permitir que la población se adapte al ambiente. Edward C. Cox, de la Universidad de Princeton, y Reinhard Piechocki, de la de Wittenberg, en Alemania Oriental, han demostrado experimentalmente en *E. coli* que, cuando las condiciones de cultivo son duras, las estirpes mutadoras dominan sobre las que presentan tasas de mutación normales. En condiciones favorables, sin embargo, el exceso de mutaciones se convierte en una carga y las estirpes mutadoras pierden la carrera.

Así, la eficacia óptima para prevenir y corregir errores depende del organismo y de las condiciones que le rodean. Cuando la vida es fácil, el cambio es más una amenaza que un beneficio; cuando la vida es dura, solamente un cambio puede ayudar. Como ocurre en tantos otros sistemas biológicos, el equilibrio entre flexibilidad y precisión de la replicación del ADN constituye un delicado, complejo y sutil producto de miles de millones de años de evolución biológica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FIDELITY OF DNA SYNTHESIS. Lawrence A. Loeb y Thomas A. Kunkel en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 52, págs. 429-457; 1982.

EFFECTS OF DNA METHYLATION ON MISMATCH REPAIR, MUTAGENESIS AND RECOMBINATION IN *ESCHERICHIA COLI*. M. Radman y R. Wagner en *Current Topics in Microbiology and Immunology*, vol. 108, págs. 23-28; 1984.

MISMATCH REPAIR IN *ESCHERICHIA COLI*. Miroslav Radman y Robert Wagner en *Annual Review of Genetics*, vol. 20, págs. 523-538; 1986.

HETERODUPLEX DEOXYRIBONUCLEIC ACID BASE MISMATCH REPAIR IN BACTERIA. Jean-Pierre Claverys y Sandord A. Lacks en *Microbiological Reviews*, vol. 50, n.º 2, págs. 133-165; junio de 1986.

DNA METHYLATION IN *ESCHERICHIA COLI*. M. G. Marinus en *Annual Review of Genetics*, vol. 21, págs. 113-131; 1987.

DNA MISMATCH CORRECTION. Paul Modrich en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 56, págs. 435-466; 1987.

Transplantes de neuronas

Las investigaciones sobre las interacciones celulares que se establecen entre neuronas transplantadas y cerebro receptor permiten prever la posible substitución de células degeneradas con injertos de tejido

Rosa-Magda Alvarado-Mallart y Constantino Sotelo

A pesar del prodigioso avance que se ha logrado en el conocimiento de la organización y funcionamiento del sistema nervioso, los métodos terapéuticos para el tratamiento de las enfermedades neurológicas son todavía bastante menos eficaces que los que disponemos para combatir las enfermedades que afectan a otros sistemas. Las razones de ese retraso pueden imputarse principalmente a la falta de poder proliferativo de las neuronas o células nerviosas, la complejidad extrema de los circuitos nerviosos y la incapacidad regenerativa de las neuronas lesionadas dentro del sistema nervioso central.

Enfermedades degenerativas como la de Parkinson o de Alzheimer, por citar sólo las más corrientes, y procesos patológicos inespecíficos, como los accidentes vasculares o traumáticos, ocasionan la muerte de ciertas poblaciones neuronales o interrumpen vías nerviosas provocando, así, la degeneración de numerosas neuronas. Y no sólo los procesos patológicos son responsables de la disminución de nuestro patrimonio neuronal: un proceso fisiológico como el envejecimiento ocasiona, también, la destrucción de un número importante de esas células. Sabemos que, después de una lesión, las neuronas que sobreviven pueden reaccionar ante la desaparición de otras y compensar en parte los déficit funcionales ocasionados. Pero, por desgracia, la plasticidad sináptica es limitada y no puede hacer frente a los trastornos causados por lesiones importantes o enfermedades degenerativas avanzadas.

ROSA-MAGDA ALVARADO-MALLART y CONSTANTINO SOTELO, de origen español, son miembros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas francés (CNRS). Ambos se formaron en la Universidad de Madrid, Alvarado-Mallart en la Facultad de Biología y Sotelo en la de Medicina, si bien han desarrollado su carrera científica en Francia. Sotelo dirige desde 1979 la Unidad 106 del INSERM, instituto francés de sanidad e investigación médica; en ese centro trabajan los autores en el proyecto de trasplantes de neuronas, aquí expuesto.

Uno de los retos que se ha fijado la neurociencia es el poder llegar a definir los mecanismos implicados en la plasticidad neuronal, así como precisar los factores químicos y mecánicos responsables de la incapacidad regenerativa de las neuronas centrales. (Por neuronas centrales entendemos aquellas cuyas prolongaciones se extienden totalmente dentro del cerebro o de la médula espinal, por contraposición a las que se localizan en los ganglios periféricos o las que se proyectan hacia los músculos.) Estas líneas de investigación han alcanzado un gran auge, en los últimos años, gracias a un nuevo enfoque experimental: los trasplantes intracerebrales de células nerviosas. La complejidad del sistema nervioso no permite imaginar, sino se quiere entrar en el terreno de la fantasía científica, que podamos algún día proceder a la substitución del cerebro o de la médula espinal, a imagen de lo que ocurre con otros órganos. Las posibilidades que nos brindan los trasplantes de tejido nervioso son mucho más modestas, aunque no menos extraordinarias. Se trata principalmente de substituir células nerviosas degeneradas e implantar en su lugar neuroblastos (células embrionarias, precursores de las neuronas, cuyo poder proliferativo no ha terminado todavía) o neuronas jóvenes (células embrionarias, que ya no se dividen si bien están todavía en una fase previa a la diferenciación o especialización).

Desde que Santiago Ramón y Cajal formuló la teoría neuronal, se sabe que el sistema nervioso está constituido por un conjunto de neuronas cuyas prolongaciones forman una red discontinua e inextricable, de extrema precisión. Los avances de las neurocencias han permitido aclarar de qué manera esos elementos se comunican entre sí para transmitir los impulsos nerviosos.

Sin detenernos a analizar las interacciones nerviosas de naturaleza puramente eléctrica que se dan en un número bastante exiguo de células nerviosas (transmisión electrotónica), las neuronas se comunican por medio de mecanismos químicos. La manera habitual es a través de la transmisión sináptica, así llamada porque se desarrolla en las sinapsis. Estas formaciones se hallan constituidas por la parte terminal de la fibra nerviosa de la neurona, el axón (prolongación del cuerpo de las neuronas, en la que el impulso nervioso se propaga centrífugamente), que entra en contacto con una porción de la membrana del cuerpo celular o de las dendritas de otra neurona (el otro tipo de prolongación de las células nerviosas, en las que el impulso nervioso se propaga centrípetamente). La terminación axónica está capacitada para sintetizar y almacenar una substancia química, el neurotransmisor. La llegada del impulso nervioso, en forma de señal eléctrica, induce la liberación del neurotransmisor, que se difunde entonces por un angosto espacio extracelular, de unos 30 nanómetros, hasta entrar en contacto con los receptores específicos presentes en la membrana de la neurona postsináptica; ello provoca, tras la apertura de canales iónicos, una respuesta eléctrica en esta célula. Lo esencial en este tipo de transmisión es su rapidez, cifrada en milisegundos, y su especificidad.

Sin embargo, en el sistema nervioso existen otros tipos de comunicación interneuronal. Por un lado, están las neuronas pertenecientes al sistema neuroendocrino, es decir, las neuronas si-

tuadas en el hipotálamo, una región del encéfalo cuyo funcionamiento es en todo comparable con el de las glándulas de secreción interna. Por otro, hay ciertas neuronas que se encuentran capacitadas para modular la transmisión sináptica. Estas células nerviosas actúan también por medio de mensajeros químicos, los neuromoduladores, cuyo efecto, de más larga duración y más difuso, no implica necesariamente una relación sináptica directa entre el elemento efector y el receptor.

El descubrimiento reciente de la coexistencia, en una misma terminación axónica, de más de una substancia neuroactiva (con frecuencia, un neurotransmisor y un neuromodulador) viene a aumentar la complejidad de los mecanismos que intervienen en las relaciones que establecen las neuronas.

Hasta el momento, no se conocen bien los mecanismos implicados en la recuperación funcional obtenida con trasplantes de tejido nervioso. Uno de los trabajos que muestran la gran complejidad de funcionamiento que pueden presentar las células injertadas es el realizado por el equipo de Manuel Nieto Sampedro en la Universidad de California en Irvine [véase "Plasticidad sináptica" de Manuel Nieto Sampedro; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1988]; esas investigaciones han demostrado una recuperación funcional de déficit de la corteza cerebral, trasplantando ya sea neuronas del mismo tipo que las degeneradas, ya sea células gliales (uno de los elementos no neuronales del encéfalo). Este hallazgo, un tanto sorprendente, puede explicarse si se considera que el efecto obtenido no es el producto de una integración sináptica de las neuronas implantadas dentro del circuito neuronal deficitario, sino el fruto de "factores tróficos" que pueden ser producidos indistintamente por las neuronas o por las células gliales implantadas.

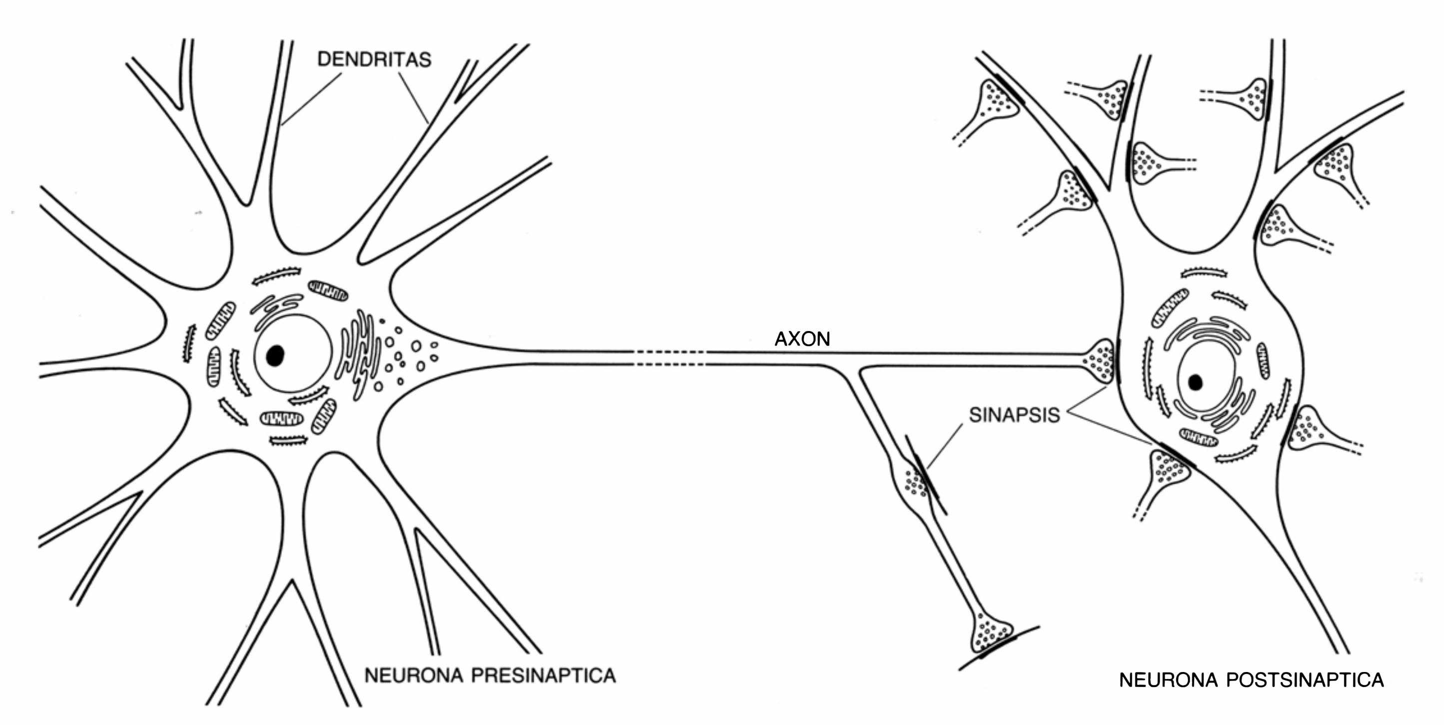
Sin embargo, otros mecanismos más específicos que la producción de fac-







1. CORTE SAGITAL de un cerebelo de ratón normal (*arriba*) y de ratón *pcd* en la región colonizada por las células de Purkinje transplantadas (*vista de conjunto en el centro y un detalle de la misma abajo*). La reacción inmunocitoquímica, con el anticuerpo *cgk*, torna evidentes los cuerpos de las células de Purkinje, así como su arborización dendrítica. Debemos destacar que en el mutante *pcd* estas células han colonizado tres lóbulos cerebelosos y se hallan localizadas, exclusivamente, en la capa molecular. Además, el árbol dendrítico de las neuronas implantadas se ha desarrollado, al igual de lo que ocurre en el animal normal, en el plano del corte representado.



2. LAS NEURONAS son células altamente especializadas, cuyo soma presenta dos tipos de prolongaciones: las dendritas y el axón. Corresponde a éste transmitir los impulsos nerviosos de una neurona a otra, a través de formaciones características denominadas sinapsis. En las dendritas, el impulso nervioso se dirige hacia el cuerpo celular. La red tridimensional, de organización precisa, formada por estas prolongaciones nerviosas reviste gran complejidad.

tores tróficos parecen intervenir en los resultados obtenidos con ese tipo de cirugía experimental. Veámoslos en orden de complejidad creciente.

Empezaremos por los injertos de nervio periférico en el sistema nervioso central, que facilitan la regeneración axónica de las neuronas centrales. Cuando se secciona o corta un axón, el cabo distal, separado de su cuerpo neuronal, acaba degenerándose irremediablemente. La neurona amputada reacciona de manera positiva e intenta regenerar el axón a partir de su cabo proximal (el más cercano al cuerpo neuronal), que desarrolla un cono de crecimiento. Si el axón se encuentra en un nervio periférico (nervios que conectan las neuronas con los músculos, los corpúsculos sensoriales, las glándulas, etc.), la regeneración puede llegar a término y la neurona lograr, en consecuencia, la reinervación de su estructura diana. Ahora bien, si el axón seccionado se encuentra en un fascículo nervioso central (es decir, en la médula espinal o en el cerebro), la regeneración es abortiva y no se produce la reinervación. Estos hechos elementales, conocidos desde hace un siglo, han instado numerosos estudios encaminados a descubrir cuál es la causa que permite la regeneración de los nervios periféricos y cuál la que impide la regeneración de los axones centrales.

El gran mérito de Alberto Aguayo, de la Universidad McGill de Montreal, ha sido demostrar que el medio celular de los nervios periféricos permite la regeneración de neuronas centrales axotomizadas. Aguayo y sus colaboradores, principalmente Manuel Vidal-Sanz, han demostrado que los axones seccionados de las células ganglionares de la retina (tejido que embriológicamente debe considerarse prolongación del encéfalo) pueden regenerarse en una longitud de tres o cuatro centímetros, a través de un puente "aneural" (fragmento de un nervio periférico en el que sólo persisten las envolturas celulares perineurales).

Las fibras visuales regeneradas pueden así alcanzar el colículo superior, uno de los centros de proyección específica de las células ganglionares de la retina. Una vez que los conos de crecimiento axónico de estas neuronas salen del nervio implantado y penetran en el parénquima nervioso central, pierden de nuevo una gran parte de su poder de elongación. Sin embargo, estos axones pueden dar brotes terminales y contactar sinápticamente con las neuronas del colículo superior. Queda aún por determinar si las sinapsis formadas son o no funcionales y si conservan su especificidad.

Aunque el número de neuronas que consiguen regenerarse a través de esos puentes es todavía bastante pequeño (un 12 por ciento de las células ganglionares de la retina), podemos concluir que los puentes de nervio periférico permiten la regeneración de axones de neuronas lesionadas y, lo que es más importante, la formación de contactos sinápticos entre neuronas centrales axotomizadas y sus centros diana.

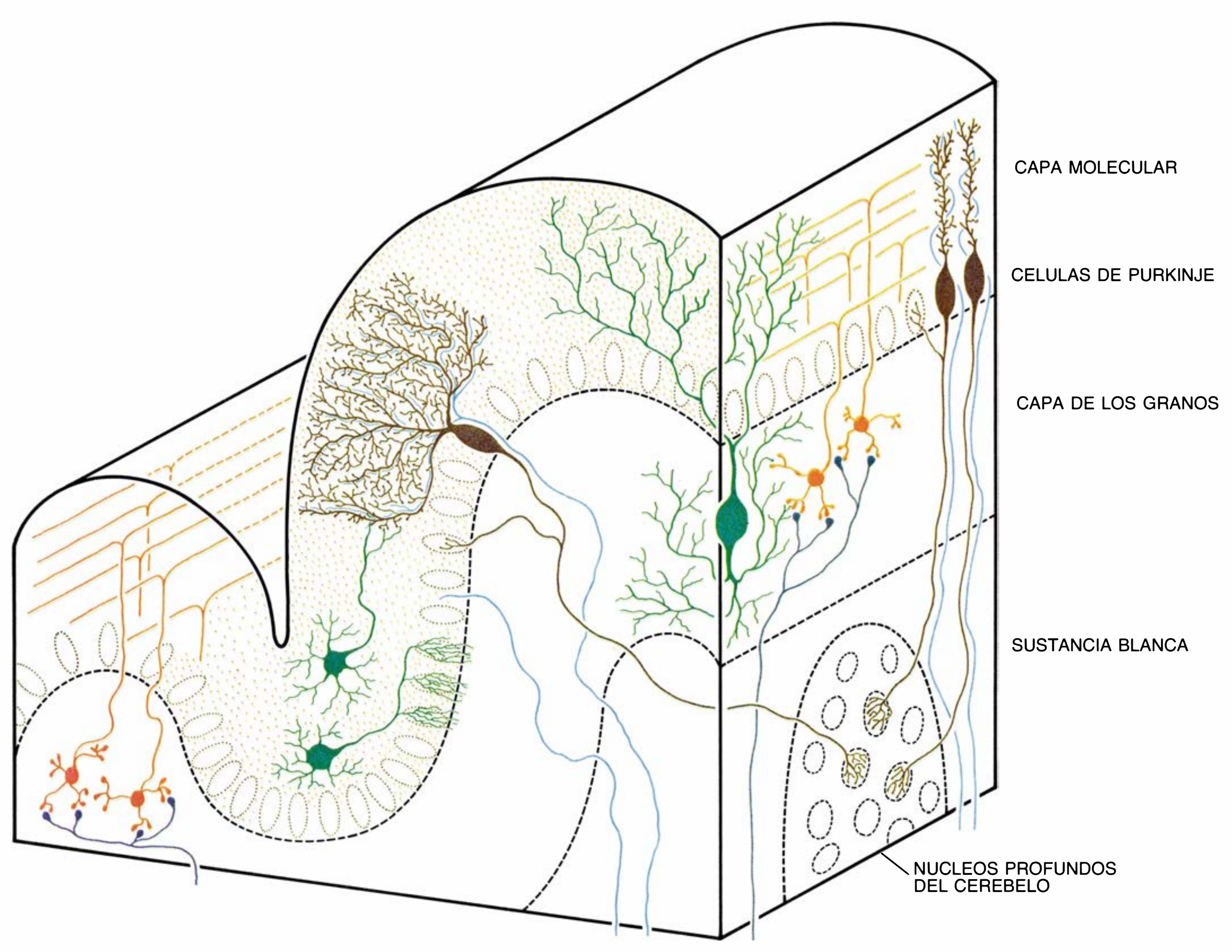
Un segundo punto a considerar es el de los trasplantes de neuronas en sistemas neuromoduladores. Si se analizan pormenorizadamente los casos en que se ha podido obtener la recuperación de funciones nerviosas gracias a un injerto neuronal, se llega a la conclusión de que, en la mayoría de ellos, las neuronas injertadas actúan como fuente de substancias neuroactivas, sin necesidad de integrarse en los circuitos neuronales deficitarios del huésped; es decir, las neuronas injertadas desempeñan un papel neuromodulador.

Veamos, por ejemplo, los experimentos realizados en un modelo animal de la enfermedad de Parkinson, cuyos resultados han tenido repercusiones importantes en neurocirugía humana. Como es sabido, la enfermedad de Parkinson produce una alteración progresiva de la motricidad humana, acompañada de temblores y de rigidez. Esta enfermedad viene causada por la degeneración de neuronas que utilizan la dopamina como transmisor químico. Las neuronas dopaminérgicas se alojan bilateralmente, es decir, a cada lado del mesencéfalo ventral, en un núcleo denominado *substantia nigra*; sus axo-

nes se proyectan sobre grandes extensiones del cerebro y, en particular, sobre el complejo estriado de los núcleos de la base del telencéfalo (núcleos caudado y putamen). Desde hace ya largos años, se sabe que la administración de L-DOPA, precursor de la dopamina, alivia considerablemente los síntomas parkinsonianos. Sin embargo, este tratamiento no está exento de efectos secundarios, cuya gravedad aumenta a medida que se prolonga el tratamiento. De ahí que se pensara que el trasplante de neuronas dopaminérgicas podría proporcionar al cerebro receptor la dopamina necesaria para paliar los efectos de la enfermedad de Parkinson.

En la rata, la administración de una substancia neurotóxica, la 6-hidroxidopamina (6-OHDA), produce la degeneración de las neuronas dopaminérgicas de la *substantia nigra* y, por consiguiente, de sus ramificaciones axónicas. Los efectos funcionales de esta lesión, en todo similar al mal de Parkinson, pueden comprobarse fácilmente mediante un test de comportamiento producido por la administración de una anfetamina estimulante del receptor de la dopamina. Varios equipos de investigación han trabajado sobre este modelo animal, obteniendo resultados superponibles. El estudio más completo, sin embargo, es el del equipo de Anders Björklund, de la Universidad de Lund, en Suecia.

El grupo de Björklund implantó, en ratas que presentaban una degeneración unilateral de las neuronas de la *substantia nigra*, injertos sólidos o en forma de suspensiones celulares, procedentes de la región ventral del mesencéfalo embrionario. Demostraron por vía anatómica, gracias al empleo de una coloración histoquímica específica, que las neuronas dopaminérgicas embrionarias se desarrollan normalmente, se las coloque en el mesencéfalo ventral, territorio dejado vacante por las neuronas desaparecidas, o se las ponga en el estriado, territorio terminal de di-



3. LOBULO CEREBELOSO, esquematizado según los planos sagital y frontal. Los diferentes elementos celulares que lo componen se distinguen aquí por tres colores arbitrarios: marrón, rojo y verde. En color marrón se han dibujado tres células de Purkinje, una en el plano sagital y dos en el frontal. Con un punteado se ha marcado el alineamiento de las otras células de Purkinje que componen la capa monocelular. La arborización dendrítica de estas células, muy espinosa, es característica y se extiende en el plano sagital del cerebelo sobre la capa molecular; los axones son las únicas eferencias de la corteza cerebelosa y se proyectan masivamente sobre las células de los núcleos profundos del cerebelo (*NF*). De color rojo se han teñido las células de los granos, cuyo cuerpo celular y sus dendritas se alojan en la capa de los granos; los axones de estas células ascienden a la capa molecular, donde se dividen en T y forman las fibras paralelas, que corren en el plano frontal del cerebelo. Estas fibras terminan sinápticamente sobre las ramas dendríticas secundarias y terciarias (compartimento distal) de las células de Purkinje. En color verde aparecen los tres tipos de neuronas inhibidoras de la corteza cerebelosa: las células de Golgi, las estrelladas y las células en cesto. El cuerpo celular y la ramificación axónica de las células de Golgi se alojan en la capa de los granos; las dendritas se extienden, sin orientación precisa, en la capa molecular. Las células estrelladas deben su denominación a la arborización dendrítica en estrella y envían su axón sobre los segmentos lisos de las dendritas de la célula de Purkinje. Los axones de las células en cesto terminan sobre el cuerpo celular y el segmento inicial del axón. De los dos tipos de fibras aferentes al cerebelo, la trepadoras (*en color azul*) terminan sobre las espinas de las dendritas primarias de la célula de Purkinje (compartimento proximal) y las musgosas (*violeta*) envían sus mensajes a las células de Purkinje por intermedio de una sinapsis sobre las dendritas de las células de los granos.





4. CORTES FRONTALES de un cerebelo de ratón adulto. La fotografía superior corresponde al cerebelo de un ratón adulto normal, tratado con el anticuerpo anti-proteína-quinasa dependiente del GMP cíclico (anti-*cgk*). Las células de Purkinje que dan respuesta positiva a ese anticuerpo aparecen teñidas en marrón (tanto su cuerpo celular como sus árboles dendríticos y sus prolongaciones axónicas. Estas, más finas que las dendríticas, son difíciles de distinguir.) La fotografía inferior corresponde al corte de un cerebelo de un ratón mutante *pcd* de dos meses de edad tratado con el mismo anticuerpo. La ausencia de células de Purkinje, degeneradas a causa de la mutación, determina que el corte aparezca totalmente inmunonegativo.

chas neuronas. Sin embargo, la asimetría motora consecutiva a la inyección de anfetamina sólo es compensada cuando la implantación de estas neuronas se hace en la última posición. Esta recuperación funcional va acompañada de una extensa ramificación axónica de las neuronas dopaminérgicas implantadas, que reinervan, al menos parcialmente, el estriado desaferentado. Debido a esa localización ectópica del cuerpo celular y las dendritas de las neuronas implantadas, es necesario admitir que el efecto paliativo obtenido por esos trasplantes tiene que obedecer a una liberación tónica de dopamina, ya que las neuronas implantadas no deben recibir las aferencias específicas que regulan la liberación de esta substancia neuroactiva.

Una vez adquiridos estos datos se intentó utilizar, como fuente de dopamina, células cromafines adultas de la médula suprarrenal. Estas células, emparentadas embriológicamente con las neuronas, son capaces de sintetizar, aunque en menor cantidad, dicha substancia. Los trasplantes de médula suprarrenal realizados en la rata fueron también eficaces para combatir parte de los déficits producidos por el tratamiento de la 6-OHDA, en general los mismos que eran corregidos por los trasplantes de neuronas fetales. Ya que las células cromafines pueden tomarse del mismo individuo que recibe el trasplante, ese tipo de injertos se hizo pensando en una ulterior aplicación en neurocirugía humana. En efecto, los autoinjertos reducen los riesgos inmunológicos de rechazo, así como las objeciones éticas consustanciales al empleo de tejido de embrión humano.

Ello nos lleva al tercer aspecto: los trasplantes intracerebrales como tratamiento quirúrgico de la enfermedad de Parkinson. Los primeros autoinjertos de células cromafines se realizaron en Suecia, en 1982, y consistieron en pequeñas porciones de médula suprarrenal. Aunque los síntomas parkinsonianos disminuyeron en los días que siguieron a la operación, los pacientes tuvieron que recurrir, de nuevo, a la L-DOPA pocas semanas más tarde.

Recientemente, Ignacio Madrazo y René Drucker-Colin, del hospital "La Raza" y la Universidad Autónoma de México, han practicado una vez más autoinjertos de médula suprarrenal en neurocirugía humana. La masa tisular implantada parecía contener no sólo numerosos trozos de la región medular de la glándula suprarrenal, sino también pequeñas porciones de la región cortical, de difícil separación. Se trata de trasplantes que han permitido una recuperación espectacular del déficit motor de los pacientes y han fomentado una ola de optimismo en todo el mundo: enfermos parkinsonianos han sido operados con esta técnica en varios países, incluidos Estados Unidos y España. Los resultados, sin embargo, no siempre resultaron tan positivos como los presentados por Madrazo. Debido a la falta de control anatómico, se desconoce el modo de acción de esos trasplantes y el destino de las células injertadas. Uno de los puntos más difíciles de interpretar es por qué los injertos implantados unilateralmente pueden paliar deficiencias bilaterales. En opinión de los autores, hay que proseguir y dominar las investigaciones realizadas en primates antes de instaurar definitivamente ese tipo de trasplantes como tratamiento terapéutico de la enfermedad de Parkinson.

La acción paliativa de los injertos neuronales se ha observado también en otros modelos experimentales que imitan comportamientos defectuosos más complejos: pérdidas de memoria, senilidad o anomalías genéticas del sistema endocrino. En los diferentes casos, al igual que en los experimentos descritos antes, sólo se consigue el efecto buscado cuando el injerto se co-

loca cerca de su territorio natural de proyección, es decir, sin que las neuronas implantadas reciban aferencias específicas del cerebro receptor.

Podemos, pues, concluir, llegados a este punto, que la eficacia de los trasplantes neuronales reside, por un lado, en la secreción de factores tróficos estabilizantes o favorecedores de la plasticidad neuronal y, por otro, en una liberación tónica de la substancia neuroactiva. Cabe preguntarse, pues, si debemos resignarnos a pensar que los injertos de tejido nervioso no van a poder conseguir nunca paliar déficits neurológicos en sistemas neuronales como los que transmiten informaciones sensoriales o motoras, en los que el funcionamiento correcto depende de la organización espacial estricta entre los elementos aferentes y eferentes del circuito. Pensemos en los trastornos mayores (paraplejía) ocasionados por una sección de la médula espinal.

Nos situamos así ante el cuarto aspecto: los trasplantes de neuronas en circuitos de proyección altamente organizados. La investigación que estamos realizando en la Unidad 106 del Instituto Nacional francés de Sanidad e Investigación Médica (INSERM), de París, está orientada a determinar cuáles son las posibilidades que ofrecen los injertos neuronales para reorganizar circuitos deficitarios en los que la integridad de aferencias/eferencias del sistema es indispensable para el buen funcionamiento del mismo. El problema inmediato que nos preocupa no es el análisis de déficits neurológicos y la determinación del grado de mejoría aportado por los injertos, sino el desciframiento de los mecanismos celulares involucrados en la formación de los circuitos nerviosos y la determinación de la operatividad de tales mecanismos en el sistema nervioso adulto.

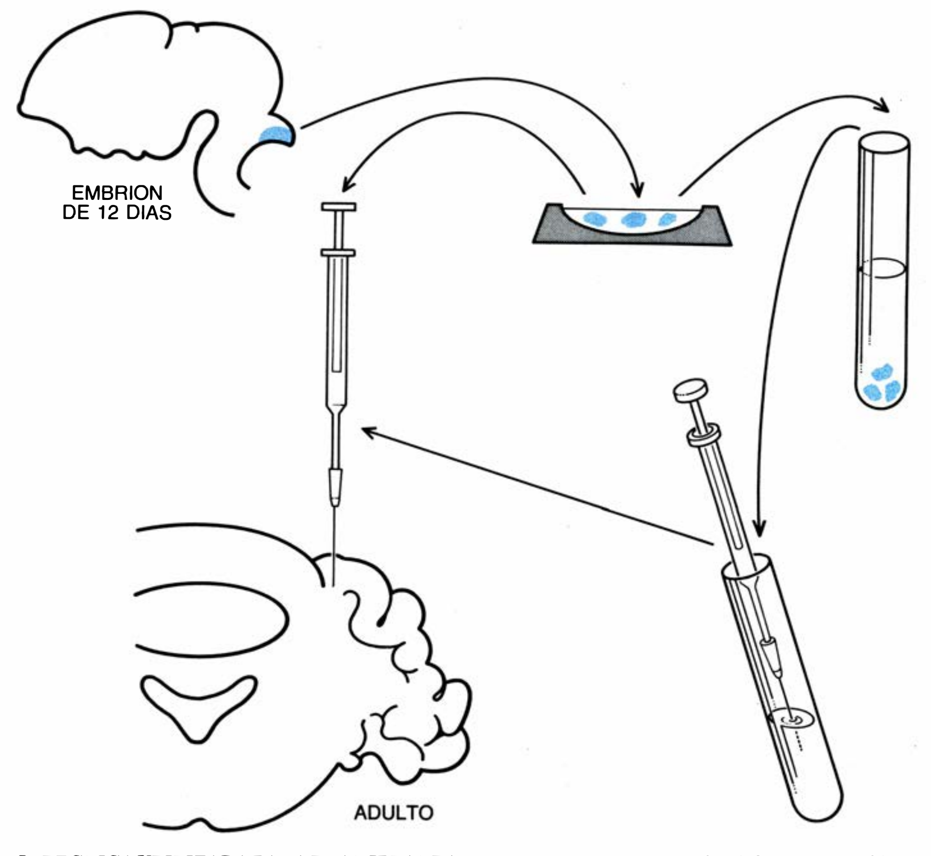
El circuito cerebeloso de los roedores (rata y ratón), que puede considerarse prototipo de un circuito de proyección altamente organizado, presenta una serie de características idóneas para nuestro propósito. En primer lugar, la organización anatómica de la corteza cerebelosa, muy sencilla, ha sido objeto de numerosos estudios en microscopía óptica y electrónica. Cinco tipos neuronales componen esta estructura y aparecen ordenados de una manera rigurosamente geométrica en toda su extensión: las células de Purkinje, las células de los "granos", las de "Golgi", las "en cesto" y las "estrelladas".

Su conexión es bastante elemental: dos tipos de aferencias excitadoras aportan al cerebelo una información procedente de los órganos de los sentidos y de la corteza cerebral; esos dos tipos de aferencias son las fibras "trepadoras" (que terminan directamente en las células de Purkinje) y las "musgosas" (que envían su mensaje a estas células por intermedio de los axones de las células de los granos, las fibras paralelas). Las órdenes dadas por este sistema salen de la corteza cerebelosa a través de un solo tipo de eferencia, los axones de las células de Purkinje, que terminan en los núcleos profundos, así llamados por la posición que ocupan en el cerebelo. Las células de Golgi, las en cesto y las estrelladas constituyen el fiel ejemplo de interneuronas que, por inhibición, controlan la actividad cerebelosa cortical.

El cerebelo presenta más ventajas todavía. Pensemos, por ejemplo, en la existencia de anticuerpos que marcan selectivamente la célula de Purkinje y facilitan su análisis morfológico. Existen, además, numerosas mutaciones en el ratón que pueden ocasionar la degeneración de ciertos elementos del circuito cerebeloso. Algunas de ellas pueden compararse con ciertas ataxias degenerativas humanas. En particular, en la mutación *pcd* (que abrevia la denominación inglesa de cierta degeneración de las células de Purkinje) los síntomas neurológicos —temblor de la cabeza y las extremidades, movimientos incoordinados— y la histopatología son semejantes a la degeneración córtico-cerebelosa familiar, descrita por Gordon Holmes en 1907.

En los ratones que sufren esta mutación, el cerebelo se desarrolla normalmente. Pero, a partir del final de la ontogénesis (segunda semana postnatal), las células de Purkinje empiezan a degenerar. A los dos meses de edad, el cerebelo de estos animalitos ha perdido ya esa población neuronal. A la muerte de esas neuronas sigue una degeneración secundaria de las células que dan origen a los dos tipos de fibras que entran en contacto directo con la célula de Purkinje. Se trata de una degeneración muy lenta y, por consiguiente, esas fibras —trepadoras y paralelas—, aunque reducidas en número, persisten largo tiempo en la corteza cerebelosa.

Nos proponíamos averiguar si las células de Purkinje embrionarias, tras-



5. TECNICA UTILIZADA PARA TRANSPLANTAR, en un esquema representativo de los pasos seguidos. El esbozo cerebeloso (*color*) se diseca a partir de un embrión normal de 12 días (*E*12), tomado de la cepa C57B1, isogénica a la que periódicamente sufre la mutación *pcd*. Pequeños trozos de estos esbozos, o unos dos o tres mililitros de una suspensión celular realizada tras tratamiento con tripsina, se inyectan con una pipeta de vidrio unida a una microjeringuilla de Hamilton, en la corteza cerebelosa de un ratón adulto *pcd*.

plantadas en la corteza cerebelosa del ratón mutante *pcd*, estaban capacitadas para substituir a las células desaparecidas. Para que esa substitución fuera válida a todos los efectos, era necesario que las neuronas trasplantadas se integraran dentro del circuito deficitario. Dicho de una forma más pormenorizada, las células tenían que: *1*) instalarse en el territorio que les era propio; *2*) recibir contactos sinápticos específicos de las fibras desprovistas de células diana del huésped, y *3*) mandar sus axones hasta su centro diana, en este caso los núcleos profundos del cerebelo huésped.

Se transplantaron esbozos cerebelosos de embriones de ratón normal de 12 días, en forma de fragmentos sólidos, o de suspensiones celulares. A esa edad embrionaria, el esbozo cerebeloso contiene progenitores de las células de Purkinje, células de Purkinje jóvenes, neuronas jóvenes de los núcleos profundos y los progenitores de todas las otras categorías neuronales de un cerebelo adulto. La separación de los precursores del tipo neuronal en cuestión, para poderlo trasplantar aisladamente, es hasta hoy imposible. Se estudiaron los ratones en distintas edades subsiguientemente al transplante, para determinar hasta qué punto las neuronas de Purkinje transplantadas eran capaces de integrarse en el circuito cerebeloso del huésped y desentrañar los mecanismos de integración de dichas neuronas.

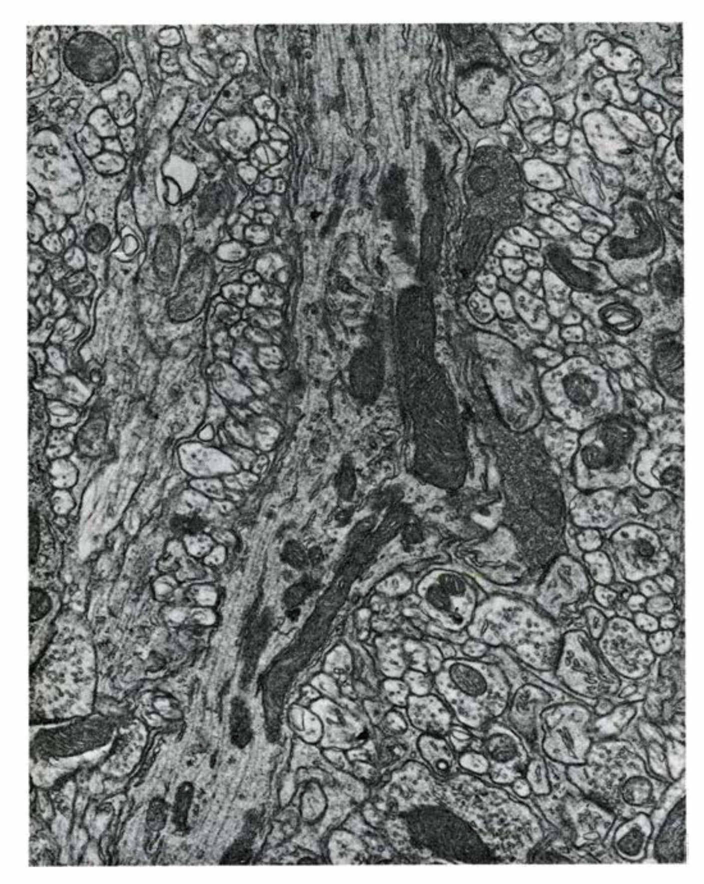
Desde las primeras observaciones realizadas, los resultados obtenidos fueron asombrosos y alentadores: todos los injertos cerebelosos proporcionan numerosas células de Purkinje al cerebelo huésped.

Sin duda alguna, el punto crucial de nuestros resultados era haber demostrado que las células de Purkinje embrionarias no sólo eran capaces de migrar a través del parénquima adulto del cerebelo huésped, sino también que el cerebelo deficitario ejercía una atracción selectiva sobre el tipo neuronal de que está privado.

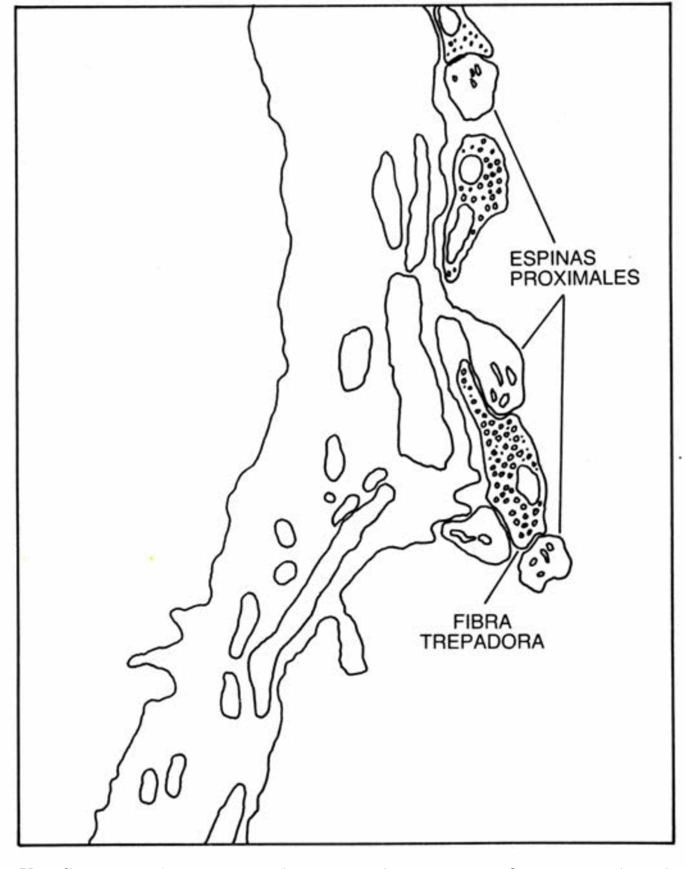
En efecto, en todos los casos numerosas células de Purkinje consiguieron salir de la masa tisular implantada e invadir los lóbulos cerebelosos, inmediatos al trayecto seguido por la pipeta de inyección. Por contra, las otras categorías neuronales del transplante quedan afincadas en masas más o menos organizadas fuera del cerebelo o enquistadas en el parénquima cerebeloso.

La migración de las células de Purkinje transplantadas para instalarse en el cerebelo huésped sigue un trayecto *sui generis*, subpial; sorprendentemente, sin embargo, tiene lugar en un período de tiempo correspondiente al que suelen usar estas células para migrar durante la ontogénesis del cerebelo normal. Las neuronas transplantadas quedan colocadas y extienden sus árboles dendríticos en el territorio que les es propio, la parte más superficial de la corteza cerebelosa, la llamada capa molecular. Pero su cuerpo celular no ha llegado a colocarse totalmente en su posición normal (en la frontera entre la capa molecular y la capa que contiene las células de los granos).

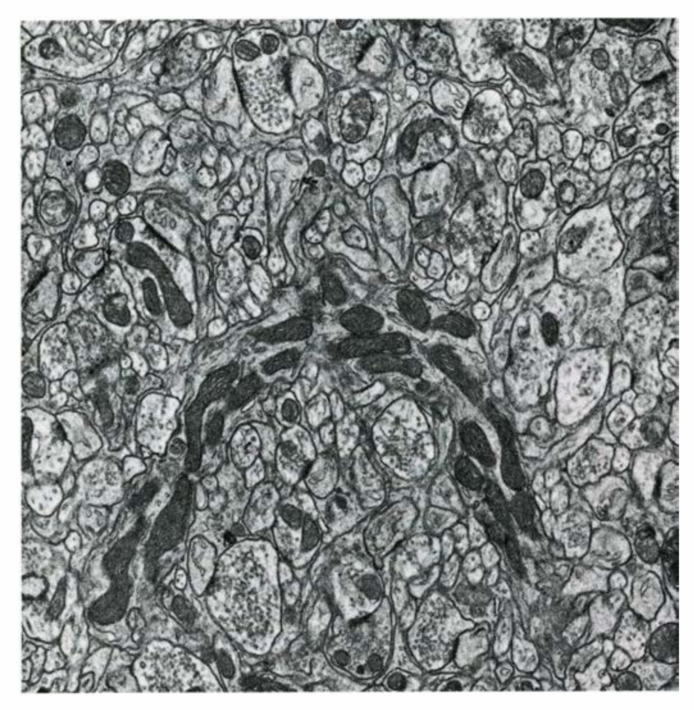
La invasión de la capa molecular de la corteza cerebelosa por células de Purkinje transplantadas ocurre también en otros casos en que se transplanta ese tipo de neuronas en cerebelos desprovistos de esa categoría neuronal; por ejemplo, en los ratones que sufren la mutación *nervous*. Interesa señalar que, en esta mutación, en la que sólo cierto contingente de células de Purkinje degenera, las neuronas que invaden el cerebelo huésped van a colocarse en las regiones dejadas vacantes por las células degeneradas.

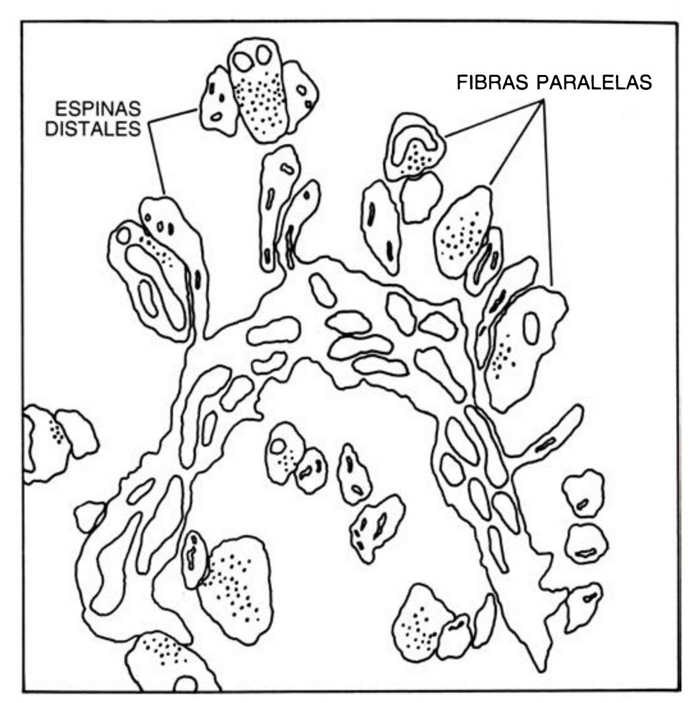


6. DENDRITA PRIMARIA DE UNA DE LAS CELULAS DE PURKINJE implantadas que han colonizado la capa molecular del cerebelo huésped.



Una fibra trepadora, perteneciente al ratón mutante *pcd*, establece sinapsis específicas sobre las espinas que salen de esta dendrita (espinas proximales).





7. SEGMENTO DENDRITICO DISTAL de otra célula de Purkinje que ha colonizado el cerebelo del ratón mutante *pcd*. Numerosas espinas pertenecientes a esta rama dendrítica son contactadas específicamente por botones sinápticos que pueden reconocerse como pertenecientes a las fibras paralelas del huésped.

Esta particularidad se repite en casos de transplantes cerebelosos en animales normales, en los que cierto número de células de Purkinje degenera por culpa de la lesión ocasionada por la pipeta de inyección.

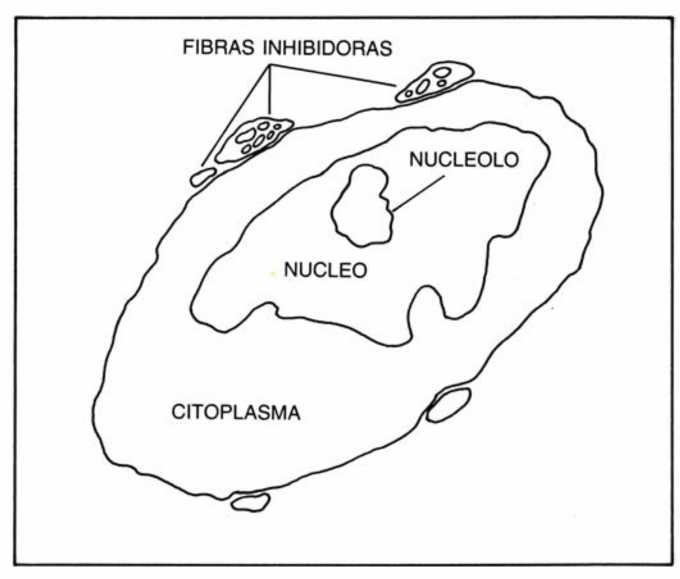
Muy al contrario, las células de Purkinje transplantadas no penetran en las regiones del cerebelo huésped que contienen esa categoría neuronal, ni en los animales normales, ni en los afectados por la mutación *nervous*. De una manera semejante, en casos de implantes en otras regiones del encéfalo, la corteza cerebral por ejemplo, las células de Purkinje transplantadas no invaden nunca el parénquima nervioso del huésped, ni siquiera cuando, en virtud de la aplicación de drogas neurotropas, esa región se halla privada de algún otro tipo neuronal.

Esos resultados muestran, en primer lugar, la atracción selectiva (neurotropismo positivo) que ejerce el cerebelo deficitario sobre las células de Purkinje transplantadas y, en segundo lugar, que las células de Purkinje normales excluyen las transplantadas.

Sin embargo, la capacidad invasora de las células de Purkinje injertadas es limitada. Nunca logran invadir una extensión superior a un radio de 70 micrometros a partir de la pipeta de inyección, lo que significa que, por punto de inyección, sólo una pequeña región de la corteza cerebelosa, que se cifra en torno al 15 por ciento, contiene dichas neuronas.

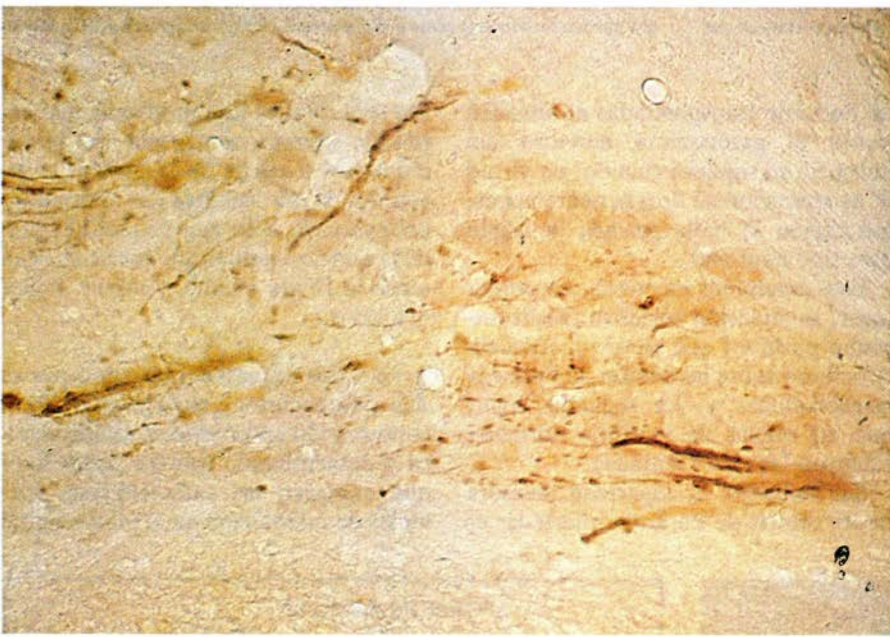
En todos los casos, esas neuronas se diferencian morfológicamente, conservando su polaridad axodendrítica y desarrollando árboles dendríticos que expresan las características normales de orientación en el plano sagital





8. CELULA DE PURKINJE que ha invadido la capa molecular del cerebelo del ratón mutante *pcd*. En el dibujo esquemático que aparece a su derecha se ilustra el contorno de dicha célula, así como cuatro botones que hacen sinapsis en ella, correspondientes a fibras inhibidoras (células en cesto) del huésped.





9. CORTE SAGITAL DEL CEREBELO de un ratón mutante *pcd* que ha recibido un transplante cerebeloso (*arriba*). Se reconocen algunos fascículos de axones inmunopositivos para el anticuerpo. Estos axones pertenecen a células implantadas y se dirigen, específicamente, hacia los núcleos profundos del cerebelo. La fotografía inferior muestra un corte contiguo al precedente: pone de manifiesto la región de los núcleos profundos del cerebelo huésped. Numerosos botones terminales (inmunopositivos para el anticuerpo), pertenecientes a las células de Purkinje implantadas, terminan en las células inmunonegativas de esos núcleos.

del cerebelo huésped. También, la diferenciación bioquímica alcanzada por estas neuronas es normal, puesto que fabrican su neurotransmisor (el ácido gamma-aminobutírico, o GABA) y todas las proteínas marcadoras de estas células: calbindina, proteínquinasa dependiente del GMP cíclico y otras.

El análisis del circuito cerebeloso por microscopía electrónica, en las regiones que comprenden células de Purkinje transplantadas, ha puesto de manifiesto que las fibras del huésped han reaccionado ante la presencia de estas neuronas y han conseguido establecer contactos sinápticos específicos con ellas. Estas neuronas reciben los mismos tipos de aferencias que en condiciones normales y la distribución espacial de las sinapsis observadas es normal también: las fibras trepadoras contactan la parte proximal del árbol dendrítico de estas neuronas y las musgosas —a través de los axones de las células de los granos, las fibras paralelas— establecen contacto con la región distal de esta arborización. Los contactos de las neuronas inhibidoras son los únicos que presentan una ligera anormalidad, puesto que la arborización de las neuronas en cesto no llega a recubrir, totalmente, la región inicial del axón de las neuronas transplantadas; se limitan a establecer contacto con el cuerpo celular y los segmentos lisos de las dendritas de esas células.

La actividad funcional de las células de Purkinje que han invadido la capa molecular del cerebelo *pcd* y de las sinapsis formadas sobre ellas han podido demostrarse electrofisiológicamente. Los registros intracelulares fueron realizados *in vitro* sobre rodajas de cerebelo que contenían esas células. Tanto la actividad eléctrica de estas neuronas como las respuestas obtenidas en ella tras la estimulación de las aferencias excitadoras e inhibidoras del huésped son muy similares a las que se registran en rodajas de cerebelo normal.

Una observación importante concierne a la sinaptogénesis entre las células embrionarias transplantadas y las aferencias adultas del huésped. El proceso atraviesa pasos morfológicos similares a los que experimenta la ontogénesis normal de la corteza cerebelosa, y viene a durar lo mismo. Podemos, pues, concluir que las células embrionarias deben emitir, durante su período de diferenciación, una serie de "señales" que son reconocidas por las fibras nerviosas adultas y que ocasionan la puesta en marcha de un nuevo período de sinaptogénesis.

Para obtener una integración completa de las células transplantadas es necesario que sus axones lleguen a establecer contacto con sus neuronas diana, que en este caso se encuentran en los núcleos profundos del cerebelo huésped. Este punto se ha analizado con métodos inmunocitoquímicos usando los anticuerpos selectivos de las células de Purkinje. Las observaciones realizadas en microscopía óptica y electrónica nos han permitido demostrar que cierto número de axones de estas células, siguiendo un trayecto normal, a través de la substancia blanca, se extienden hasta los núcleos profundos del huésped y que, una vez allí, dan numerosas ramas terminales que contactan específicamente con sus células diana. Sin embargo, el número de neuronas que logran proyectar hasta su centro diana es muy pequeño, y éstas no se dan en todos los casos. Las causas

responsables de esta limitación pueden estar relacionadas con la atracción ejercida sobre el axón de las neuronas transplantadas por las células nucleares del donante que quedan afincadas en la masa tisular del injerto, o relacionadas incluso con la posición ectópica del cuerpo celular de muchas de las neuronas transplantadas y su orientación axo-dendrítica, frecuentemente anormal, que puede restringir, también, la capacidad de sus axones para encontrar el substrato que les conduce hasta su centro diana.

Sin embargo, el impedimento mayor debe corresponder al crecimiento limitado que presentan los axones dentro del sistema nervioso central, que parece constituir la causa fundamental de la incapacidad regenerativa de las neuronas centrales y de la limitación encontrada hasta ahora en todos los tipos de transplantes realizados en los diversos sistemas neuronales, según vimos antes.

Aunque quedan todavía muchos puntos por resolver, la afinidad selectiva que muestra el cerebelo deficitario por el tipo neuronal de que está privado y la atracción que tales neuronas embrionarias ejercen sobre las fibras desaferentadas adultas del huésped nos dejan concluir con una nota optimista: el sistema nervioso adulto presenta condiciones que permiten, además del desarrollo morfológico, bioquímico y funcional de las neuronas implantadas, la integración sináptica específica de las mismas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GROWTH AND DIFFERENTIATION OF CEREBELLAR SUSPENSIONS TRANSPLANTED INTO THE ADULT CEREBELLUM OF MICE WITH HEREDODEGENERATIVE ATAXIA. C. Sotelo y R.M. Alvarado-Mallart en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 83, págs. 1135-1139; 1986.

MECHANISMS OF ACTION OF INTRACEREBRAL NEURAL IMPLANTS: STUDIES ON NIGRAL AND STRIATA GRAFTS TO THE LESIONED STRIATUM. A. Björklund, O. Lindvald, O. Isacson, P. Brundin, K. Wictorin, R. E. Strecker, D. J. Clarke y S. B. Dunnett en *TINS*, vol. 10, págs. 509 1987.

EMBRIONIC AND ADULT NEURONS INTERACT TO ALLOW PURKINJE CELL REPLACEMENT IN MUTANT CEREBELLUM. C. Sotelo y R.M. Alvarado-Mallart en *Nature*, vol. 327, págs. 421-423; 1987.

AXONAL REGENERATION AND SYNAPSE FORMATION IN THE SUPERIOR COLLICULUS BY THE RETINAL GANGLION CELLS IN THE ADULT RAT. M. Vidal-Sanz, G. M. Bray, M. P. Villegas-Pérez, S. Thanos y A. J. Aguayo en *The J. of Neuroscience*, vol. 7, págs. 2894-2909; 1987.

Ciencia y sociedad

Ahora verán ustedes...

Tras la extraordinaria investigación *in situ* de un experimento que ofrecía resultados inexplicables a la luz de la ciencia ortodoxa, se le ha reprochado al influyente semanario *Nature* que un grupo francés propalara y defendiera luego una interpretación engañosa de sus datos. *Nature* publicó en junio un trabajo donde se describía el experimento en cuestión. Lo firmaba un equipo de 13 científicos de cuatro países, encabezados por Jacques Benveniste, conocido farmacólogo del Instituto Nacional francés de Salud e Investigaciones Médicas.

El grupo investigaba un fenómeno relacionado con la alergia. Cuando una clase determinada de anticuerpos se topa con un basófilo humano (un tipo de glóbulos blancos, o leucocitos), se une a un receptor de su superficie y provoca la "degranulación" de la célula: los gránulos de histamina que se encuentran en el interior del basófilo liberan su contenido al medio envolvente. Degranulación que puede observarse con técnicas comunes de tinción microscópica.

Los experimentos se realizaron a instancias de dos colegas de Benveniste que practican la homeopatía. Según esa filosofía médica marginal, rechazada por la mayoría de los científicos, sustancias presentes en concentraciones mínimas pueden ejercer efectos muy potentes. El equipo francés pretendía determinar hasta qué grado de dilución el anticuerpo seguía provocando la degranulación. La respuesta que obtuvieron, y que aún defienden, fue "sorprendente": por lo menos hasta un millón de trillones de trillones.

A esas diluciones no existe virtualmente niguna posibilidad de que reste siquiera una sola molécula de anticuerpo. Empero, Benveniste y sus colegas afirmaban que diluciones sucesivas, de agua pura por lo que parecía, que dividían por diez la concentración, provocaban una respuesta en los basófilos que seguía dándose en diluciones superiores. El desconcierto subió de tono al comprobar que, para que se produjera el efecto, debía agitarse vigorosamente (procedimiento recomendado en la homeopatía). Benveniste postuló que el agua debía contener una extraña estructura autoperpetuante que "recordaría" la presencia de anticuerpos.

Según Benveniste, grupos distintos repitieron con éxito el experimento en seis laboratorios de cuatro países. Su informe afirmaba que se aplicaron controles científicos rigurosos para descartar la contaminación, y que se siguieron procedimientos de doble ciego, con el fin de que, al valorar la magnitud de la degranulación (contando células teñidas sobre portaobjetos de microscopio), los experimentadores no supieran cuál había sido la concentración del anticuerpo.

Pese a que sus revisores no habían logrado encontrarle falta, a *Nature* le incomodaba publicar el singular informe, y se insertó junto al trabajo de Benveniste una "reserva editorial" donde se señalaba que los resultados podían "no tener fundamento físico". Para acceder a la publicación del trabajo, *Nature* exigió a Benveniste que un grupo de observadores asistiera a la realización de los experimentos, condición que éste aceptó.

A principios de julio los observadores llegaron a París. Formaban el singular grupo James Randi "el asombroso", mago profesional conocido por haber echado por tierra falsos fenómenos paranormales, y su ayudante José Alvarez; Walter W. Stewart, de los Institutos Nacionales de la Salud, que durante los últimos años ha investigado en profundidad errores y faltas de congruencia en la bibliografía científica, y John Maddox, redactor jefe de *Nature* y físico. De inmediato, los observadores comprobaron que el procedimiento no funcionaba siempre ni con todas las muestras de sangre. También les informó Benveniste que Elizabeth Davenas, la primera firmante del informe de *Nature*, tendía a obtener mejores resultados que los demás.

Según la investigación del semanario, los errores del procedimiento experimental ensombrecían la interpretación estadística de los resultados obtenidos anteriormente por los autores franceses. Los observadores de *Nature* asistieron siete veces al experimento. Las tres primeras pruebas fueron "abiertas": los presentes conocían la concentración de las muestras. En la cuarta no conocían la identidad del portaobjetos sobre el que realizaban el recuento. Los cuatro ensayos parecían mostrar pruebas de algún efecto a diluciones extraordinarias, si bien los resultados del cuarto diferían en detalle de los anteriores. En las tres últimas demostraciones, Randi introdujo un procedimiento secreto de codificación que impedía a los experimentadores obtener dato alguno sobre la preparación que contaban. En esas circunstancias, que el grupo francés no había empleado antes, no se evidenció ningún efecto a altas diluciones; antes bien, los resultados coincidían exactamente con los predichos por la ciencia ortodoxa.

Nature concluye que "el fenómeno descrito no es reproducible, en el sentido habitual del término". Sugieren los observadores que el sesgo de los resultados probablemente sea fruto de la autosugestión, más que de ningún fraude. En ese caso, parece haberse contagiado a otros autores. Bruce Pomeranz, de la Universidad de Toronto, uno de los coautores de Benveniste, afirma haber demostrado el efecto de la dilución en Toronto, pero que sus resultados son provisionales.

A Benveniste le ha molestado y dolido lo que considera una mala jugada de los investigadores. En particular, señala que el cuarto experimento de los siete a que asistieron los observadores de *Nature* sólo puede explicarse por acción del efecto que postula o por un fraude deliberado a cargo de los participantes; e insiste en que ha eliminado cualquier posibilidad de fraude. Discrepa rotundamente con la conclusión del equipo de *Nature* según la que los datos acumulados por los científicos franceses contienen menos errores experimentales de lo que resulta posible. Asimismo afirma que la presencia de testigos en los experimentos no constituye un modo de hacer ciencia; por el contrario, los experimentos deberían repetirse en otros laboratorios.

El 28 de julio *Nature* publicó su crítica de los experimentos, junto con una refutación de Benveniste. Algunos científicos culpan a *Nature* por presentar primero el estudio de Benveniste. "Es periodismo de la peor calaña", opina Henry Metzger, de los Institutos Nacionales de la Salud, experto en reacciones alérgicas. Otros, sin embargo, consideran que la cuestión ejercerá sobre la ciencia un efecto disciplinario

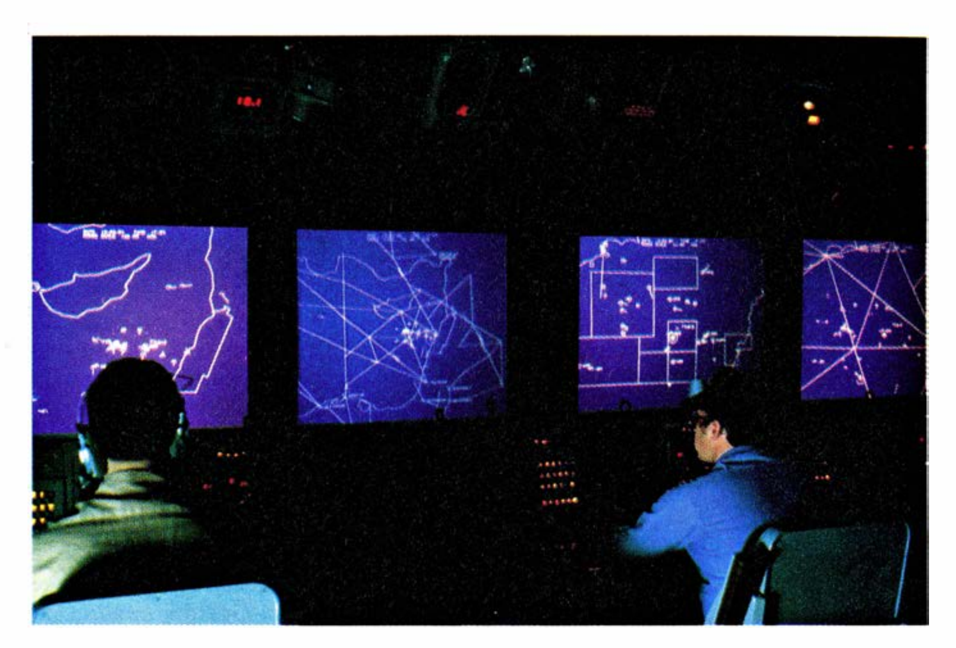
y, por tanto, en última instancia benéfico. Maddox dice no estar arrepentido. "Todos hemos aprendido mucho, añade, aunque otro asunto es que también lo haga Benveniste."

Guerra de las galaxias en el mar

El crucero portamisiles U.S.S *Vincennes* está dotado con el sistema de defensa antiaérea Aegis, lo mejor en su género y valorado en 1200 millones de dólares. Piedra angular del sistema es el radar de barrido electrónico: según la armada estadounidense, puede seguir el movimiento de centenares de objetos aerotransportados en una extensión de la superficie de Texas. El Aegis interviene también en la dirección de las operaciones de combate: los ordenadores analizan los datos y recomiendan acciones, o incluso las inician. El 3 de julio de 1988, el *Vincennes* cometió un terrible error: destruyó un aparato comercial confundiéndolo con un reactor agresor.

¿Puede compararse el Aegis con la Iniciativa de Defensa Estratégica (SDI), el escudo contra misiles nucleares previsto por el presidente Reagan? Los expertos del Pentágono parecen creerlo así, y no se recatan en aludir al Aegis como la "guerra de las galaxias en el mar". El comandante William J. O'Connell, portavoz de la SDI, ha afirmado que el Aegis demuestra que "se han alcanzado ya los niveles de refinamiento que requeriría la gestión del combate y el mando y control [de la SDI]". Richard L. Rumpf, de la armada norteamericana, señala que el general James A. Abrahamson, director de la SDI, está "vivamente impresionado" por el Aegis y ha ordenado a los proyectistas de la SDI que tomen buena nota del mismo.

Para facilitar esa transferencia tecnológica, la organización de la SDI ha convocado al capitán John J. Donegan, supervisor del programa Aegis durante siete años, para que dirija la oficina de la primera fase del programa. En la opinión de este oficial, existe un paralelismo fundamental entre el Aegis y la SDI. Aunque la Junta de Jefes ha estipulado que la defensa estratégica cuente con "un hombre en la cadena", esa máquina de guerra podría estar capacitada, como el Aegis, para combatir por sí sola, sin control humano, "cuando no quepa la menor duda [del peligro] y cuando resulte difícil que un individuo reaccione ante la situación". Así opina Donegan.



1. EN LAS GRANDES PANTALLAS de un crucero portamisiles equipado con el sistema Aegis (no se trata del Vincennes*) se vigilaban en 1984 los mares que bordean el Líbano. Fotografía de la armada de los Estados Unidos*

Cuando el Aegis del *Vincennes* detectó el despegue de un avión en Irán, que ponía rumbo hacia el buque, en la cadena había un hombre. Will C. Rogers III, capitán del *Vincennes*, dispuso de unos siete minutos para estudiar la información que le ofrecía Aegis y actuar, o no actuar, en consecuencia. Los datos eran confusos. La aeronave emitía manifiesta y simultáneamente una radioseñal civil y un código IFF (por *identification friend or foe*, identificación de amigo o enemigo) utilizado por los cazas F-14 iraníes. Por desgracia, los sensores y ordenadores del *Vincennes* fueron incapaces de informar a Rogers que el supuesto F-14 era en realidad un Airbus, una aeronave de construcción francesa tres veces mayor que el caza. Para proteger su navío, disparó contra el avión dos misiles superficie-aire.

Para Thomas F. Curry, jefe científico de E-Systems, empresa que trabaja para el ministerio de defensa, el accidente ilustra "un clásico problema militar; a saber, identificar el hombre contra el que disparas". Curry, que durante unos 30 años ha sido especialista de combate electrónico de la armada, opina que ni el radar ni ningún otro ingenio disponible puede distinguir, a partir sólo de una imagen, si un avión es amigo, enemigo o neutral. A falta de contacto visual claro, los combatientes se fundan en el IFF, un "santo y seña secreto" que emite señales de radio y no voces humanas. Pero el IFF sirve únicamente para identificar a los amigos que poseen la contraseña. Ahora bien, no puede darse crédito absoluto ni siquiera a la contraseña, pues el enemigo podría conocerla (como parece que era el caso del *Vincennes* con la clave de los F-14 iraníes). Curry comenta que, pese a la gravedad del problema de la identificación, los sistemas como el Aegis suelen ensayarse en situaciones de "guerra total", en las que un objeto no identificado se considera agresor.

Para Curry y otros analistas, la defensa estratégica apostada en el espacio se hallaría expuesta a más errores de identificación que el *Vincennes*. Si en la cadena de la SDI se intercalara un hombre, se encontraría sometido a una presión mucho mayor que la que soportó Rogers: no ya un buque, los Estados Unidos dependerían de su decisión. Dispondría también de menos tiempo. Según los expertos del Pentágono, la defensa estratégica se aprestaría a destruir los misiles soviéticos en la fase de despegue, antes de que liberaran las ojivas, mezcladas con chatarra y señuelos. El lanzamiento duraría unos cinco minutos, o menos si los soviéticos emplearan cohetes de combustión rápida.

Los "ojos" electrónicos de un sistema SDI, que no serían a lo mejor más pentrantes que los del *Vincennes*, habrían de hacer frente a una misión mucho más delicada. La proliferación de misiles soviéticos en buques, submarinos y plataformas terrestres móviles (y la posibilidad de que otras naciones hostiles fabricaran misiles nucleares) obligaría a someter a observación la

mayor parte del globo. Es conocida la tendencia de los sensores infrarrojos instalados en satélites a dar falsas alarmas, y probablemente se emplearían esos dispositivos para detectar los lanzamientos. Los que dan hoy el primer aviso de alarma al Mando de la Defensa Aeroespacial de América del Norte (NORAD) han tomado por misiles incendios forestales o de pozos petrolíferos. Los sensores tampoco deben confundir con misiles atacantes el centenar de cohetes que la Unión Soviética lanza anualmente. El anuncio previo al lanzamiento mitigaría el problema, pero no lo resolvería. En efecto: el *Vincennes* disponía de un horario de vuelos donde no faltaba el 655 de la Iran Air.

John E. Pike, especialista en asuntos espaciales de la Federación de Científicos Norteamericanos, añade que el Aegis se ha sometido a años de pruebas, contra objetivos reales y en combate, mientras que la defensa estratégica sólo puede experimentarse con las amenazas inventadas o simuladas por sus equipos. La tragedia del Airbus iraní demuestra, según Pike, que "el mundo es más complejo de lo que imaginamos. "¿Quién iba a decir que un avión comercial emitiría a la vez la señal civil y militar?"

Hay otra faceta de discrepancia entre el Aegis y la SDI. El error de juicio del *Vincennes* costó la vida de 290 personas. Un fallo de la defensa estratégica resultaría inmensamente más caro. Richard L. Garwin, de IBM, veterano crítico de la iniciativa, señala que si la Unión Soviética y Estados Unidos despliegan sendos sistemas de tipo SDI, las armas enemigas apostadas en el espacio constituirían el objetivo principal, y la principal amenaza, de ambos bandos. Ante esa espada de Damocles, un meteorito, un fragmento de residuo espacial o un satélite podrían confundirse con un ataque y precipitar el combate en el espacio. Dada la trabazón que existiría entre la defensa y el despliegue de ataque, afirma Garwin, vendría inmediatamente el lanzamiento de misiles. Y añade: "Luego, todo acaba hecho humo".

Inconstante solar

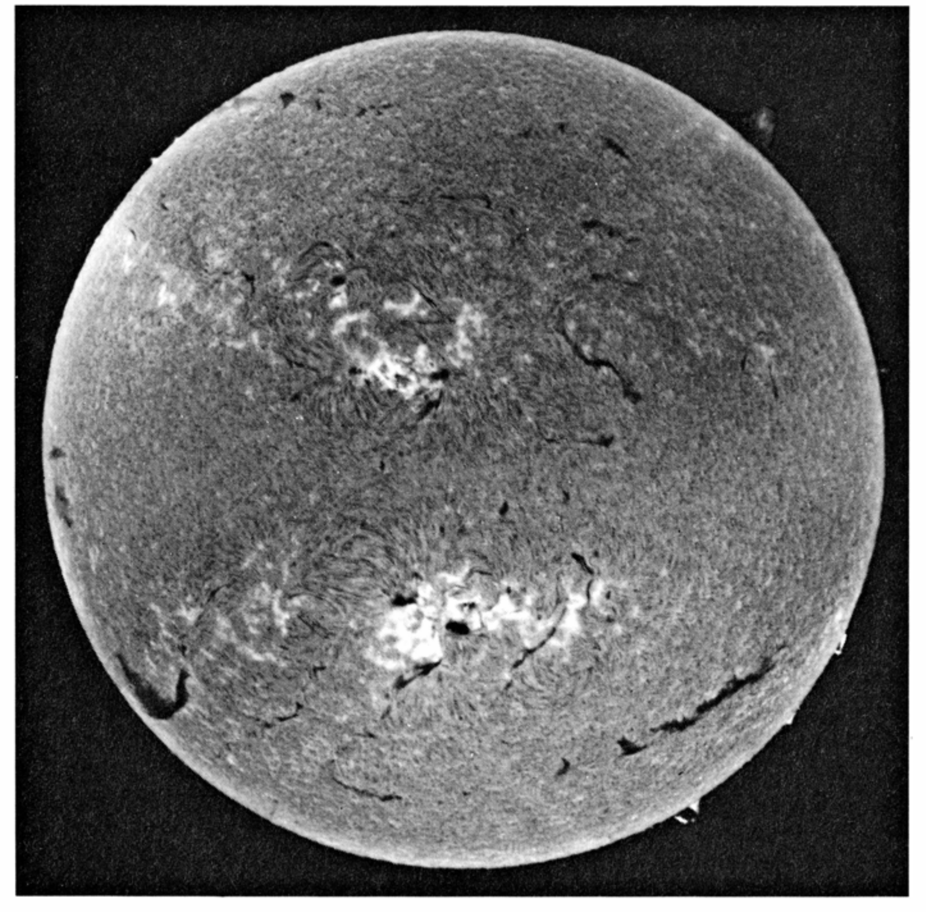
Hace más de 150 años, los astrónomos descubrieron que el número de manchas solares aumentaba y disminuía según un ciclo de 11 años. Desde entonces se especula si el ciclo solar ejerce alguna influencia en las condiciones meteorológicas de nuestro planeta. En nuestro siglo XX, hubo ya quien relacionó el ciclo con las sequías del medioeste norteamericano. Pero ninguna correlación de las ofrecidas superaba un análisis riguroso.

Tenía la culpa, en primer lugar, nuestro escaso conocimiento de las propias manchas solares. La observación ha revelado que esos remolinos de fuego representan zonas de intensa actividad magnética, donde ha quedado bloqueada la energía radiativa del astro; son, además, mucho más frías que las regiones brillantes del Sol. Pero no se ha logrado determinar cómo se crean las manchas ni el efecto que ejercen sobre la constante solar (un término inapropiado que remite a la radiancia total del Sol en cualquier instante).

Los datos suministrados por el satélite *Misión del Máximo Solar*, que ha venido midiendo la constante solar desde 1980, el máximo del último ciclo solar, parecen haber resuelto cuando menos aquella última cuestión. Según fue descendiendo, a lo largo de 1986, el número de manchas solares, el satélite registró un progresivo oscurecimiento del Sol. En 1987, al proliferar las manchas, el Sol ha ganado en brillo. Según Richard C. Willson, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, y Hugh S. Hudson, de la Universidad de California en San Diego, los datos sugieren que nuestro astro es un 0,1 por ciento más luminoso en el máximo del ciclo solar, cuando crece el número de manchas solares, que en su nadir.

Muestran los datos que las manchas no provocan directamente el aumento del brillo solar; todo lo contrario. Cuando aparece una mancha, provoca en un principio un ligero apagamiento, pero luego (al cabo de semanas o meses) suelen emerger cerca de la mancha islas de un brillo intenso (las denominadas fáculas) que compensan con creces la pérdida radiativa. Willson afirma que las fáculas podrían representar zonas donde la energía, bloqueada primero bajo la mancha solar, acaba rasgando la superficie.

¿Se manifiesta en el tiempo meteorológico terrestre la sutil fluctuación de la constante solar? Recientes informes estadísticos ofrecen pruebas de que así es; pero de un modo más bien indirecto. En el vínculo parece mediar la oscilación cuasi bienal (QBO), un giro de 180 grados del sentido de los vientos estratosféricos que circulan sobre los tró-



2. MANCHAS SOLARES rodeadas de fáculas en una fotografía tomada el pasado 1 de julio y proporcionada por la Administración Nacional estadounidense de los Océanos y la Atmósfera

picos que se produce cerca de cada dos años.

Karin Labitzke, de la Universidad Libre de Berlín, y Harry van Loon, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas en Boulder, Colorado, descubrieron esa transmisión por la QBO. Obtuvieron registros de la temperatura y presión del aire en diversas latitudes y altitudes a lo largo de los tres últimos ciclos solares. No advirtieron correlación entre el ciclo y sus datos hasta que separaron los datos en dos categorías: los obtenidos durante la fase occidental de la QBO (cuando los vientos estratosféricos soplan hacia el oeste) de los recolectados durante la fase oriental. Surgió entonces una notable correlación: las temperaturas y presiones coincidentes con la fase occidental de la QBO se incrementaban y disminuían de acuerdo con el ciclo solar.

Partiendo de ese hallazgo, Brian A. Tinsley, de la Fundación Nacional de la Ciencia, advirtió una correlación estadística entre el ciclo solar y la posición de las tormentas en el Atlántico Norte. Tinsley encontró que, durante la fase occidental, la latitud de las tormentas variaba con el ciclo solar: las tormentas que se desencadenaban hacia el máximo del ciclo solar avanzaban en latitudes unos seis grados más próximas al ecuador que las que se generaban durante el nadir del ciclo.

Labitzke, van Loon y Tinsley reconocen que sus hallazgos son todavía algo imprecisos. ¿Por qué parece que el ciclo solar influye más durante la fase occidental de la oscilación cuasi bienal que durante la fase oriental? ¿Cómo provoca una variación del 0,1 por ciento de la radiación solar los cambios, mucho más destacados (de hasta seis grados Celsius en las regiones polares), que han observado Labitzke y van Loon? "No podemos explicarlo" afirma sencillamente este último.

John A. Eddy, del Instituto Nacional de Investigaciones Atmosféricas, opina, sin embargo, que esos hallazgos de la QBO, igual que los datos de la *Misión del Máximo Solar*, "parecen boyas de referencia" en las investigaciones sobre un posible vínculo entre el ciclo solar y la meteorología. De avanzar en el conocimiento del efecto tampón ejercido por el amortiguamiento de los océanos sobre la acción solar, tales hallazgos podrían propiciar modelos dotados de algún valor predictivo. Los próximos años se anuncian especialmente ricos en flujo solar. A partir del reciente ritmo de aparición de manchas solares, algunos autores predicen que el ciclo solar actual, que alcanzará el máximo en 1991, generará una cantidad récord de manchas.

El misterio de las microondas

El suave tapiz de microondas que recubre el firmamento, supuesta reminiscencia de la gran explosión, está llenando de perplejidad a los cosmólogos. Durante varios años se han venido acumulando pruebas de un universo formado por cúmulos de galaxias rodeados de inmensos vacíos; para justificarlo, los investigadores han buscado en vano la correspondiente irregularidad en el fondo de microondas. Pero se ha encontrado un rompecabezas inesperado. Las mediciones realizadas por un equipo de científicos japoneses y norteamericanos en longitudes de onda de la radiación cósmica que hasta la fecha no se habían sondeado sugieren que, poco después de la gran explosión, un misterioso fenómeno podría haberlas distorsionado o amplificado.

Los cosmólogos venían creyendo que el fogonazo de la gran explosión se había conservado punto menos que inmutable a lo largo de los tiempos, con la salvedad del pronunciado corrimiento hacia el rojo correspondiente a la expansión del universo. Apoyaban tal supuesto las mediciones realizadas, de acuerdo con las cuales el fondo de microondas presentaba el espectro característico de la radiación de cuerpo negro. Si no la altera la radiación procedente de otras fuentes, ni el medio que lo separa del observador, la emisión de un objeto caliente —un tostador, una estrella o la bola de fuego primordial de la gran explosión— semejan a menudo la radiación de un cuerpo negro, cuyo espectro de radiación siempre alcanza un máximo en una longitud de onda que depende de la temperatura del objeto. Los objetos calientes presentan la longitud de onda más corta, o más azul; en los más fríos es más larga, más roja. El espectro declina a un ritmo característico hacia las longitudes de onda más cortas y más largas.

Las observaciones anteriores señalaban que el fondo de microondas alcanzaba su máximo a longitudes de onda ligeramente superiores al milímetro y descendía en longitudes de onda más largas, como correspondería a la radiación de cuerpo negro de un objeto que se encontrara a 2,7 grados Kelvin. Sin embargo, no se había logrado determinar el espectro correspondiente a las longitudes de onda más cortas, en la banda submilimétrica. Emisiones térmicas extrañas, por lo general procedentes de la atmósfera o del propio aparato experimental, contaminaban siempre las mediciones.

Puede que la banda submilimétrica haya revelado por fin sus secretos a un equipo de la Universidad japonesa de Nagoya y de la Universidad de California en Berkeley. A principios de 1987, el grupo lanzó un radiómetro refrigerado por helio, situándolo a más de 300 kilómetros de distancia de la Tierra, muy por encima de la atmósfera. Los datos transmitidos por el aparato no evidenciaban signos de contaminación; informaron, en cambio, de que la intensidad de la radiación submilimétrica excedía con creces la esperada para un cuerpo negro de 2,7 grados. El exceso de radiación equivalía a un 10 por ciento del total del fondo de microondas. "Se trata de un efecto enorme", opina Paul L. Richards, de Berkeley, integrante del equipo.

El grupo ha esperado hasta junio de este año para presentar sus hallazgos en el *Astrophysical Journal*, pero los teóricos han estado más de un año dándole vueltas a su significado. Así, sólo dos semanas después de que apareciera el trabajo de Nagoya/Berkeley, la misma publicación incluia un comentario de Cedric G. Lacey y George B. Field, del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard, sobre dos de las primeras teorías que se han avanzado. Según una, durante los primerísimos estadios del universo, el vacío que separaba las galaxias se llenó con gas ionizado; electrones calientes de ese plasma impartieron parte de su energía a fotones de la gran explosión y distorsionaron el espectro del cuerpo negro. La segunda teoría propone que las explosiones de supernova de la primera generación de estrellas llenaron de polvo el universo; cuando la radiación de otras estrellas calentó ese polvo, su brillo se sumó a la radiación residual de la gran explosión.

Lacey y Field sostienen que ninguno de esos mundos produciría el exceso de radiación observado por el grupo de Nagoya/Berkeley. Según sus cálculos, el primero peca por defecto en un factor de 700, por lo menos, y el segundo en un factor de 2, por lo menos. Sin entrar a analizarlos, los investigadores mencionan ciertos mecanismos exóticos que pudieron aportar la energía necesaria para generar el exceso de radiación submilimétrica. Se cuentan entre esos hipotéticos fenómenos las cuerdas cósmicas superconductoras, partículas que se desintegraron poco después de la gran explosión y agujeros negros supermasivos.

Existe otra explicación, menos atractiva. David T. Wilkinson, de la Universidad de Princeton, indica que las observaciones pudieron contaminarse con gases de combustión del cohete, con hielo depositado sobre el instrumento al atravesar la atmósfera o por algún otro efecto, desconocido. "La historia de los experimentos en las cercanías del espectro infrarrojo realizados con cohetes está repleta de errores", comenta. Pero añade que el equipo de Nagoya/Berkeley "es muy experto. No podía hallarse mejor colaboración".

Richards afirma que sus colegas y él mismo son conscientes de que los datos deben confirmarse. Así esperan hacerlo el año próximo en un experimento de seguimiento. Si la prueba no borra las dudas sobre la validez de los datos, el satélite *Explorador del Fondo Cósmico*, cuyo lanzamiento también está previsto para 1989, podría ofrecer una comprobación independiente. Sin embargo, la misión principal del satélite es buscar los "valles y colinas" que tantos



3. CARACOLAS DE CONCHA MARRON abundan en una costa donde las olas baten constantemente y hay lechos de mejillones (arriba)*; en una playa resguardada* (abajo) *predominan los caracoles de concha blanca*

cosmólogos esperan hallar en la radiación de fondo de microondas.

De concha dura

Cualquiera que haya rastrillado la arena de la playa sabe que hay caracolas de múltiples tamaños y colores. No es raro incluso que las especies presenten un notable polimorfismo, variación, en algún rasgo.La variación constituye la materia prima sobre la que actúa la selección natural; durante mucho tiempo se ha creído que el polimorfismo del color de la concha había evolucionado como camuflaje protector en respuesta a la depredación por las aves y otros enemigos que actúan guiados por la vista. Sobre sustratos oscuros abundan más las conchas marrones y, sobre los claros, las conchas blancas.

Un informe publicado en *Evolution* sugiere ahora que, al menos en una especie de caracola, el color de los adultos guarda más relación con el estrés fisiológico que con el camuflaje. En una serie de experimentos realizados en un trozo de la costa meridional de Massachusetts, Ron J. Etter, de la Universidad de Harvard, ha encontrado que, en el caracol intermareal *Nucella lapillus*, el color varía en función de la naturaleza de la línea de costa donde habita el molusco. En áreas expuestas de la orilla, donde es grande la acción del oleaje, las caracolas son en su mayoría marrones; en las bahías y calas más resguardadas predomina el blanco.

Etter midió la temperatura interna de las formas marrones y blancas en condiciones naturales, en puntos expuestos y resguardados de la costa, y encontró que la absorción de calor por el caracol está poderosamente influida por el color de la concha. Sometidos directamente a la luz del sol, en los caracoles marrones la temperatura subía más deprisa, alcanzaba un máximo superior y la desecación era más rápida que en los blancos. Tras una hora de exposición al sol, a una temperatura de 21 grados Celsius y una humedad relativa del 64 por ciento, los caracoles marrones aparecían moribundos; los blancos no evidenciaban estrés.

Etter cree que esa diferencia de susceptibilidad al estrés fisiológico explicaría mejor que el color la distribución geográfica de *N. lapillus*. En las costas expuestas, donde es intensa la acción del oleaje y los lechos de mejillones retienen agua cuando baja la marea, predominan los caracoles marrones, más vulnerables. En las orillas protegidas, donde es menor el efecto de las olas y la retirada de la marea crea un sustrato relativamente caliente y seco, dominan las formas blancas.

Los caracoles marrones podrían eludir la exposición emigrando a microhábitats más sombríos y húmedos, pero Etter opina que su mayor susceptibilidad al estrés les impondría una desventajosa limitación del área de depredación e incrementaría el tiempo que deben mantenerse ocultos. Ello, a su vez, frenaría las tasas de crecimiento y reduciría los niveles de fecundidad.

¿Sugiere la hipótesis fisiológica del estrés que esos caracoles no tienen depredadores? "En absoluto", dice Etter. En los estómagos y en las deposiciones fecales de peces y de aves costeras abundan los caracoles juveniles, de cáscara delgada y que no superan el milímetro de longitud. Y cree por esa razón que el camuflaje quizá sí influye en la supervivencia de los juveniles. Pero se apresura a añadir que, al llegar a la madurez, no es ya el camuflaje, sino el estrés fisiológico, el factor determinante del color de la concha.

Transición de fase

Los cambios de fase forman parte de nuestra vida cotidiana: si la refrigeramos, el agua acabará por congelarse; si la calentamos, por transformarse en vapor. El calor no es el único agente capaz de propiciar las transiciones de fase. Desde la década de 1940 se sabe que la aplicación de un campo eléctrico hace que ciertos materiales en estado fluido se tornen progresivamente más viscosos y solidifiquen. Se trata de los fluidos electro-rheológicos, o ERF. Los avances registrados en el campo de los ERF los han transformado de curiosidad de laboratorio en un dominio tecnológico de prometedor futuro.

El ERF típico es una suspensión de finas partículas de vidrio, arcilla o incluso almidón, en un fluido no conductor, por ejemplo, aceite de transformador. Al aplicar una diferencia de potencial de varios miles de volt a una célula que contenga ese tipo de mezcla, la suspensión adquiere, en una fracción de segundo la consistencia de la gelatina. No se entiende el mecanismo de acción de los ERF, pero se adivinan ya múltiples aplicaciones, en especial en la industria automovilística: frenos de ajuste eléctrico, válvulas, sistemas de suspensión y de transmisión, bobinas y embragues.

Uno de los problemas que planteaban los ERF tradicionales es que contienen agua, que se consideraba elemento esencial: sin ella los ERF no podrían pasar de la forma líquida a la sólida. Sin embargo, el agua tiende a corroer cualquier pieza con la que haga contacto y además limita el intervalo de temperaturas de aplicación. Por debajo de los cero grados Celsius el agua se congela y por encima de los 70 se evapora, en cuyo caso la corriente eléctrica calienta los ERF y éstos se debilitan; ello obliga a aplicar un campo eléctrico más potente, para reforzarlos, lo que aumenta aún más la temperatura. El agua hierve y el dispositivo se estropea.

Parece haberse dado solución al problema del agua. En 1987, Hermann Block y Jeffrey P. Kelly, del Instituto Politécnico Cranfield, en Inglaterra, patentaron un ERF "sustancialmente anhidro": un ERF que actúa en ausencia de cantidades apreciables de agua. Se sirve, como fluido, de un polímero orgánico semiconductor suspendido en aceite, que puede operara entre −30 y 200 grados Celsius.

No se han quedado a la zaga los científicos estadounidenses. En mayo, Frank E. Filisko y William E. Armstrong, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, patentaron una clase de ERF "sustancialmente libres de agua adsorbida". El ERF del equipo de Michigan consta de partículas cerámicas de un aluminosilicato inmersas en aceite; se ha ensayado ya a temperaturas de hasta 300 grados Celsius.

Las patentes no cuantifican las expresiones "sustancialmente anhidro" ni "sustancialmente libres de agua adsorbida". El grupo de Cranfield ha afirmado en público que su ERF contiene menos del 5 por ciento de agua, mientras que Filisko sostiene que su ERF opera "por debajo de cualquier nivel detectable de agua", lo que quiere decir menos de una parte por millón. ¿Va a plantearse algún conflicto legal entre las patentes? Las composiciones de los ERF inglés y estadounidense son muy distintas pero, como dice Filisko, "siempre que hay un dólar en juego vienen los problemas legales".

Por supuesto, en el asunto va de más de un dólar. Desde que ha obtenido la patente, se han puesto en contacto con Filisko distintas empresas: Chrysler, Ford, GM, TRW, Exxon, Toyota, Mitsubishi ("lo que pida"), y ha hablado con más de 100 compañías sobre posibles aplicaciones. De momento, la tarea de los científicos consiste en obtener una explicación física del comportamiento de los ERF. Filisko insiste en que "las explicaciones que se están dando son erróneas". Y, sin querer aventurar de momento el mecanismo que subyace al cambio de fase de los ERF, confía en desarrollar un modelo correcto antes de un año.

Una cuarta familia de partículas

Se conocen tres familias de partículas elementales, agrupadas en quarks y leptones. Experimentos recientes apuntan hacia la existencia de una familia más, pero quizá no haya más de cinco

David B. Cline

Los físicos que estudian la naturaleza fundamental de la materia creen que la diversidad del universo puede explicarse suponiendo la existencia de unas cuantas partículas elementales. Una fe que ha recibido sólido respaldo. En los años centrales de este siglo, la aparente simplicidad del protón, el neutrón, electrón y sus equivalentes de antimateria se disolvió en centenares de partículas subnucleares. En los años setenta, la idea de la simplicidad resurgió con el descubrimiento del quark, para volverse a complicar con la aparición subsiguiente de nuevos quarks.

Diríase que hoy la batalla puede terminar en un pacto de compromiso. Por un lado, las observaciones de los isótopos deuterio y helio en el espacio profundo, junto con experimentos de los laboratorios de aceleradores, indican que el número de partículas fundamentales conoce límite. Por otro lado, hay indicios de que el número en cuestión superaría el de las tres familias de quarks aceptadas. Para avivar el interés, existe la esperanza de que las respuestas a cuestiones profundas —el origen de la masa, por ejemplo— se hallen al alcance de los nuevos aceleradores, muy refinados, que están empezando a funcionar.

Para comprender por qué algunos físicos creen que habría una cuarta familia de quarks, pero no muchas más de cuatro, debemos conocer primero qué puede explicar hoy el modelo estándar de la física de partículas y qué no. Casi todos los campos del saber tienen su modelo estándar; el de la física de partículas se basa en la hipótesis según la cual la materia ordinaria consta de dos clases de partículas, los quarks y los leptones, y las fuerzas establecidas entre ellas se transmiten mediante una tercera clase de partículas llamadas bosones. Los leptones incluyen el electrón y su neutrino; los quarks se combinan para formar partículas mayores, tales como el protón y el neutrón. Un ejemplo de bosón lo constituye el fotón común, que transmite la fuerza electromagnética.

Se han descubierto por vía experimental tres familias de quarks, cada una de las cuales está formada por dos partículas, lo que da un total de seis quarks. La primera familia está formada por el quark "arriba" ("up") y el quark "abajo" ("down"). El quark arriba tiene una masa de unos cuatro millones de electronvolt (MeV), aproximadamente 1/250 veces la masa del protón (cifrada en torno a los mil millones de electronvolt, 1 GeV). La masa del quark abajo es ligeramente mayor, de unos 7 MeV. La segunda familia está integrada por el quark "extrañeza" y el quark "encanto", con masas aproximadas de 150 MeV y 1300 MeV, respectivamente. La tercera familia está constituida por el quark "fondo" ("bottom"), conocido como quark "belleza" en las partes civilizadas del mundo, con una masa de 5,5 GeV, y el quark "cima" ("top") o "verdad" ("truth"), todavía por descubrir [*véase la figura 3*].

El protón tiene una unidad de carga eléctrica positiva; no así los quarks, que la poseen fraccionaria. El quark "arriba" tiene una carga fraccionaria de 2/3; el quark "abajo", una carga de −1/3. El protón consta de dos quarks "arriba" y uno "abajo", lo que da la carga total requerida de 1. El neutrón, constituido por dos quarks "abajo" y un quark "arriba", posee una carga eléctrica total nula. De manera similar, los distintos quarks pueden combinarse para formar todas las otras partículas conocidas, salvo leptones y bosones.

Cada familia de quarks tiene una masa que viene a decuplicar la masa de la familia precedente. Esto sugiere que cualquier nuevo quark será muy masivo. En efecto: experimentos recientes del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, establecen un límite inferior de unos 50 GeV para la masa del quark "verdad", todavía por descubrir. Sin embargo, en cada familia las masas de los quarks se encuentran, unas de otras, dentro de un orden de magnitud; por ello, los físicos esperan que el quark "verdad" no tenga una masa superior a 10 veces la masa del quark "belleza". (Si los futuros experimentos de acelerador produjeran un quark "verdad" dotado de gran masa, los teóricos no se lo explicarían.)

Familias de leptones

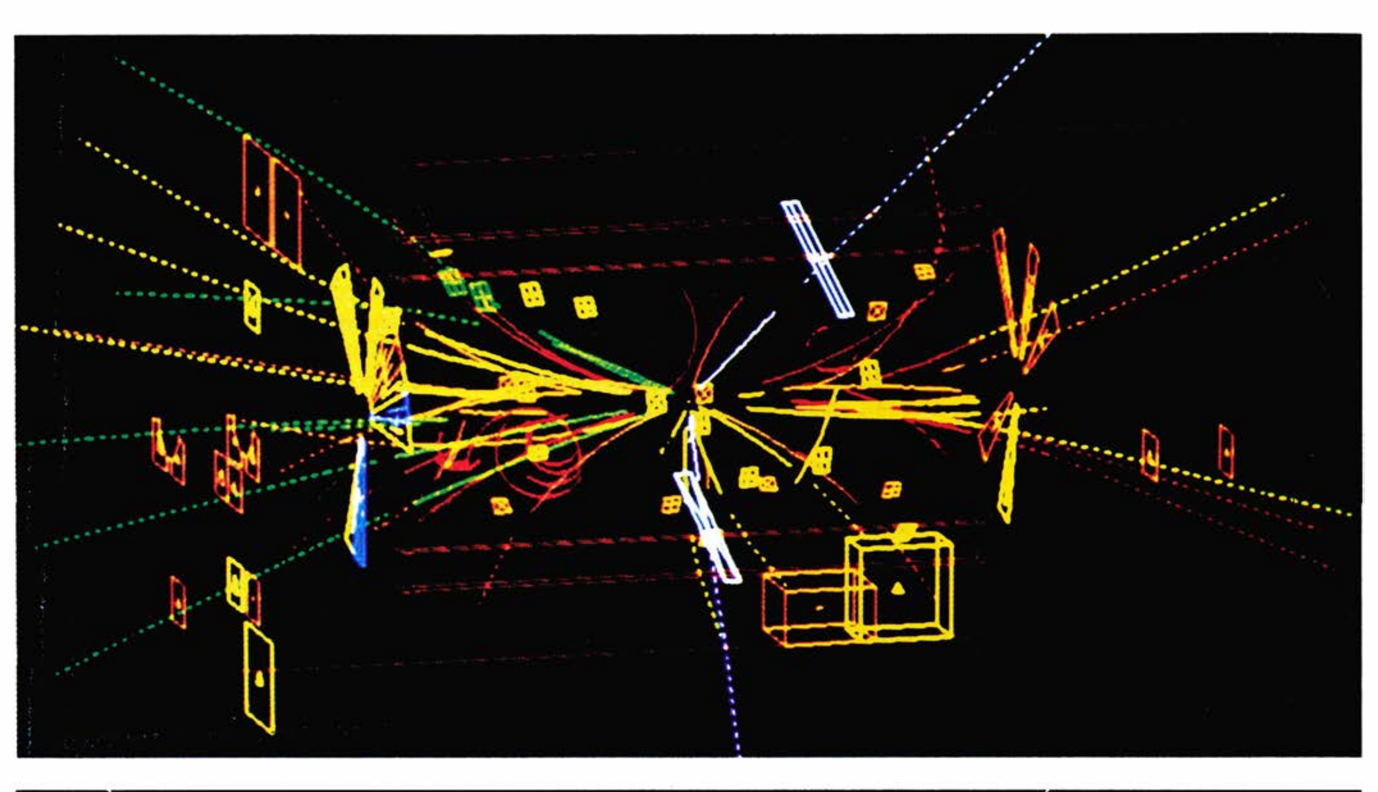
Desde una perspectiva experimental, cada familia de quarks se halla asociada a una familia de leptones; cada una de éstas consta de un leptón cargado y uno neutro. En la primera familia, el leptón cargado es el electrón y el neutro es el neutrino electrónico; en la segunda fa-

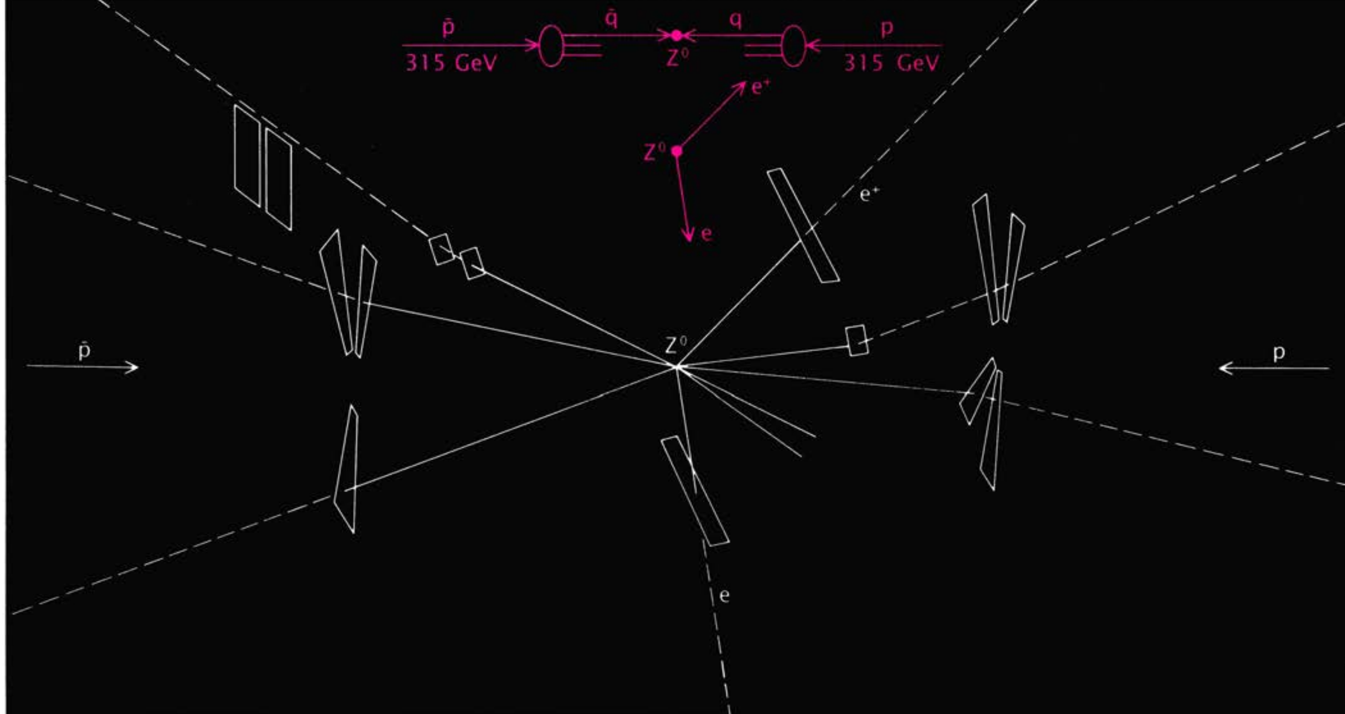
DAVID B. CLINE enseña física y astronomía en la Universidad de California en Los Angeles, tarea que comparte con la de investigador en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas. Comenzó su formación en la Universidad de Kansas y obtuvo su doctorado, en 1965, por la Universidad de Wisconsin en Madison. Ha sido profesor de física en Wisconsin e investigador en el Fermi National Accelerator Laboratory. Cline ha puesto su empeño en el diseño de una "fábrica" de mesones B, la construcción de un telescopio de rayos gamma de alta resolución y el estudio de haces colisionantes en el CERN.

milia, los leptones son el muon y el neutrino muónico, y en la tercera familia, el tauón y el neutrino tauónico.

Comparados con los quarks, los leptones se caracterizan por su extraordinaria ligereza [*véase la figura 4*]. El electrón tiene una masa aproximada de 1/2 MeV; las observaciones de los neutrinos electrónicos de la supernova 1987A confinan su masa por debajo de 16 electronvolt. Los astrofísicos lo razonan así: la velocidad de las partículas dotadas de una masa en reposo no nula varía con su energía, de manera que el tiempo de llegada de una salva de neutrinos masivos debería dispersarse en un período finito. El hecho de que todos los neutrinos de la supernova 1987 llegaran a la Tierra en un intervalo de trece segundos estableció el límite de 16 eV. Y como sólo hay un límite superior, la masa real del neutrino electrónico será nula.

El leptón cargado de la segunda fa-





1. PRODUCCION Y DESINTEGRACION de un bosón vectorial intermedio neutro (partícula Z^0). Se muestran en una imagen creada en el ordenador, junto con un dibujo que identifica los sucesos. La partícula Z^0 se produjo mediante colisiones quark-antiquark en el experimento UA1 del colisionador protón-antiprotón del CERN; la partícula se desintegra en un par electrón-positrón. (Las otras trazas corresponden a partículas formadas por los haces colisionantes.) La partícula Z^0 puede desintegrarse en todas las familias de leptones, neutrinos incluidos. Si hubiera un número infinito de familias de neutrinos, la desintegración de Z^0 en el par electrón-positrón no se habría visto nunca. El hecho de que se vea, con una probabilidad elevada, limita el número de familias.

milia, el muon, tiene una masa de unas 200 veces superior a la del electrón; por lo demás es idéntico. Los límites experimentales acerca de la masa del neutrino muónico exigen que ésta sea menor que 100.000 eV. Sin embargo, los límites cosmológicos son mucho más restrictivos; exigen que la masa de cualquier neutrino se halle por debajo del exiguo valor de 65 eV. El neutrino tauónico no se ha observado todavía directamente, pero su compañero, el tauón, fue descubierto en 1976 por Martin L. Perl y sus colaboradores del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC). La partícula tiene una masa de 1,8 GeV. Como la teoría exige que el tauón posea su propio neutrino, los físicos confían en que el neutrino tauónico exista. Los experimentos directos cifran la masa del neutrino tauónico por debajo de 70 MeV; de nuevo, el límite cosmológico no alcanza 65 eV.

A semejanza de las familias de quarks, las de leptones se agrupan en distintos intervalos de masa. La masa del muon viene a ser unos dos órdenes de magnitud mayor que la del electrón; la masa del tauón multiplica por 20 la del muon. Podría esperarse entonces que cualquier leptón cargado adicional poseyera una masa entorno a unos 40 GeV. Tal como indicaré más abajo, los actuales límites inferiores, experimentales, para las masas de nuevos leptones cargados se muestran coherentes con esta predicción. Las masas de los neutrinos pueden también distar grandes intervalos, pero debido a que sólo se han establecido límites superiores todo lo que se puede decir ahora es que dicha masa es muy pequeña en comparación con la que ofrecen sus compañeros cargados.

La parvedad de la masa del neutrino nos señala la segunda diferencia importante entre quarks y leptones: además de ser los segundos mucho más ligeros, en términos absolutos, que sus quarks asociados, los cocientes de masas en el seno de las familias de quarks son mucho menores que los cocientes dentro de las familias leptónicas asociadas. En el interior de cada familia de quarks, el cociente de masas de los quarks no es mucho mayor que 10. Por citar un caso, el cociente de las masas del quark "abajo" y el quark "arriba" es próximo a 2. Los leptones presentan un aspecto distinto: debido a los límites superiores de las masas de los neutrinos, el cociente entre la masa del electrón y la del neutrino electrónico se cifra en torno a 10.000; si el neutrino careciera de masa, el cociente sería infinito.

El modelo estándar ha acertado también en la descripción de los bosones, las partículas que transmiten las fuerzas entre las otras partículas. En la teoría de Maxwell del electromagnetismo, este papel lo desempeña el fotón, que transmite la fuerza electromagnética. El modelo estándar actual cuenta con la fuerza débil, que rige las desintegraciones radiactivas, y la fuerza fuerte, que liga los núcleos. Por tanto, se necesitan otros bosones. Las interacciones débiles (pensemos en la desintegración del neutrón en un protón y un electrón) que involucran el intercambio de carga eléctrica se rigen por el bosón vectorial intermedio cargado, *W*. Otras interacciones débiles que no exigen un intercambio de carga corren a cargo del bosón vectorial intermedio neutro, Z^0. Uno de los grandes triunfos del modelo estándar fue la predicción de las masas de las partículas *W* y Z^0. Ambas partículas se descubrieron luego, en el CERN, en 1983, con las masas previstas. Las demás propiedades observadas de las partículas mantienen también un notable acuerdo con la teoría.

FAMILIA	1	2	3	AUN NO DETECTADOS 4
LEPTONES	$\binom{\nu_e}{e^-}$	$\binom{\nu_\mu}{\mu^-}$	$\binom{\nu_\tau}{\tau^-}$	$\binom{\nu_L}{L}$
QUARKS	$\binom{u}{d}$	$\binom{c}{s}$	$\binom{t}{b}$	$\binom{t'}{b'}$
BOSONES DE AFORO: FOTON, GLUON, $W^\pm$, Z^0, GRAVITON				ESCALAR DE HIGGS

2. MODELO ESTANDAR de la física de partículas. De acuerdo con el mismo, la materia está formada por quarks y leptones y las fuerzas que intervienen se transmiten mediante bosones. Cada familia de leptones consta de un leptón cargado y uno neutro mucho más ligero; son, sucesivamente, el electrón (e^-) y el neutrino electrónico (ν_e), el muon (μ) y el neutrino muónico (ν_μ) y el tauón (τ) y el neutrino tauónico (ν_τ). Según el modelo estándar, cada familia de leptones está asociada a una familia de quarks formada por dos partículas: un quark "arriba" (*u*, de "up") y un quark "abajo" (*d*, de "down"); un quark "extraño" (*s*, de "strange") y uno "encantado" (*c*, de "charm"); un quark "fondo" (*b*, de "bottom") y un quark "cima" (*t*, de "top") o "verdad". El quark "verdad" no se ha detectado todavía. Si el emparejamiento de familias continúa hasta la cuarta generación, cabría esperar descubrir un cuarto leptón cargado (*L*) y un cuarto neutrino (ν_L), así como dos quarks más que aquí llamamos t' y b'. (La ilustración del artículo ha sido realizada por Gabor Kiss.)

Defectos en el modelo

A pesar de tales éxitos, el modelo estándar presenta graves defectos. De entrada, no determina en absoluto el número de familias de quarks y leptones. ¿Por qué hay tres familias, por lo menos, si sólo se necesita la primera familia para formar los protones, neutrones y electrones ordinarios del universo? O, tal como dijo I. I. Rabi hace 50 años, "¿quién encargó el muon?".

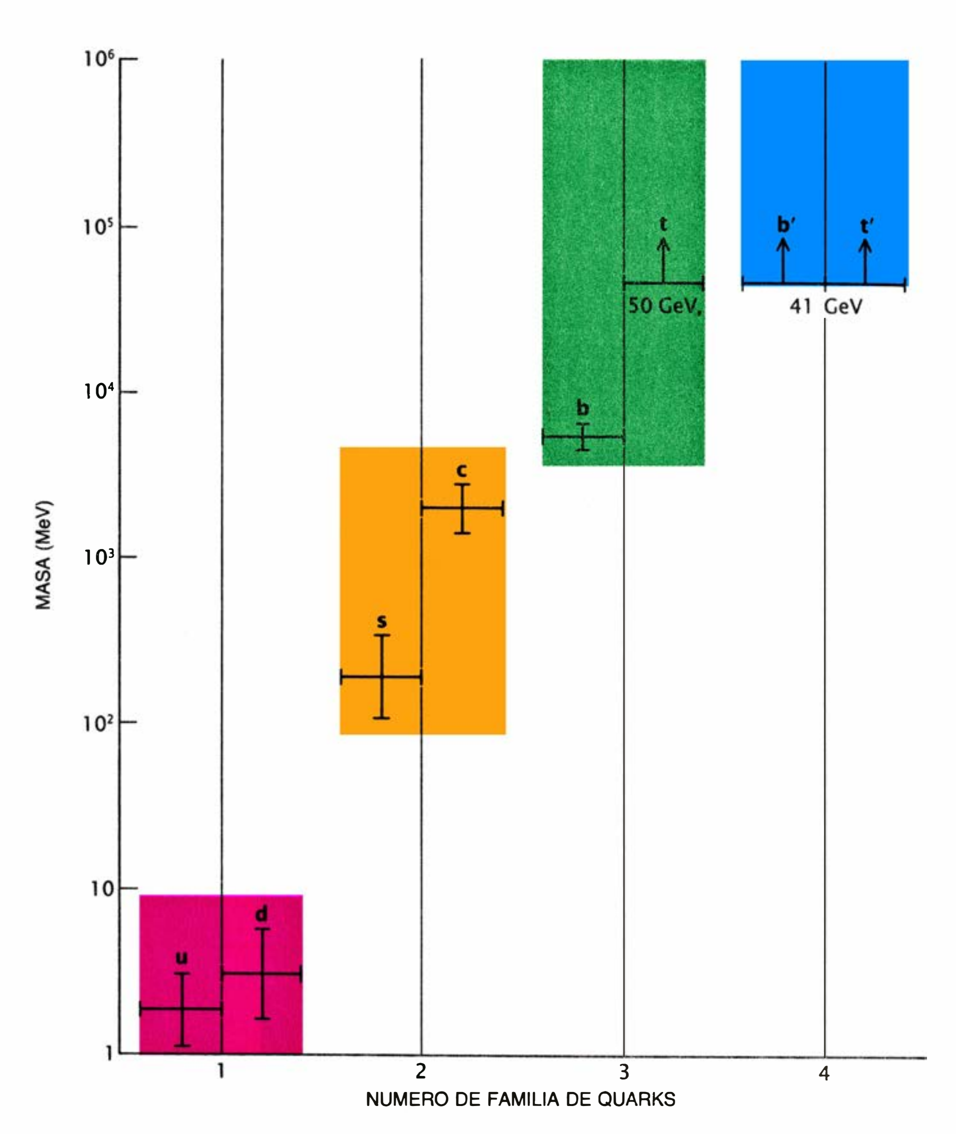
El modelo estándar falla también en la predicción de las masas de todas las partículas restantes; el límite inferior de 50 GeV para la masa del quark "verdad" es un resultado experimental; nadie sabe cuál es el límite superior. El modelo tampoco explica la jerarquía de las masas de quarks y leptones antes descrita. ¿Por qué están las masas de las familias separadas aproximadamente por un orden de magnitud en el caso de los quarks y dos órdenes de magnitud en el caso de los leptones? ¿Por qué los cocientes de las masas de los quarks en el seno de una familia son tan pequeños y los cocientes de las masas de los leptones tan grandes? A lo largo de los años se ha insistido en los esfuerzos numerológicos por explicar este espectro de masas, sin el menor éxito; ahí reside una de las principales cuestiones que tiene pendientes el modelo estándar.

Las preguntas relativas al número de familias, las masas y las jerarquías entre éstas no son las únicas que el modelo estándar deja abiertas. Hay más: mientras se repite la observación según la cual clases diferentes de quarks se transforman unas en otras, ese fenómeno no se ha visto nunca entre los leptones. Por dar un ejemplo, el quark encantado se desintegra en un quark extraño y una partícula "*W* virtual" (que puede considerarse un *W* real dotado de una vida media brevísima que impide su observación directa). Pero nunca se ha visto que un muon se desintegre en un electrón y un fotón; la probabilidad de que esto suceda se ha reducido experimentalmente hoy en día a menos de una parte en 100.000 millones.

Esta proliferación de misterios ha llevado a algunos teóricos a sospechar la existencia de una cuarta familia de quarks y leptones. El descubrimiento de tal familia aclararía algunas cuestio-

nes que han permanecido abiertas durante mucho tiempo. Citemos así la violación de la paridad de carga, fenómeno que se relaciona, a su vez, con las probabilidades de transición quark-quark examinadas antes. Hasta los años sesenta, los físicos habían supuesto que las propiedades mensurables de todo sistema físico se mantendrían invariables al transformar cada partícula en su antipartícula y reflejar el sistema en un espejo. Debido a que la reflexión en un espejo se denomina inversión de paridad, y porque cambiar una partícula por su antipartícula implica cambiar su carga, la tesis según la cual todo sistema debe permanecer inalterado bajo la combinación de estas operaciones se conoce como ley de invariancia bajo la paridad de carga.

Tan acariciada creencia en la invariancia CP cayó en 1964, cuando Val L. Fitch, James W. Cronin, James H. Christenson y René Turlay, de la Universidad de Princeton, estaban investigando el ritmo de desintegración del mesón *K* neutro, o kaón. Normalmente, el kaón se desintegra en otras tres partículas (por ejemplo, en tres piones); esa transición es coherente con la ley de invariancia CP. Sin embargo, el experimento de Princeton mostró que, aproximadamente una vez de cada quinientas, el kaón se desintegraba en sólo dos piones: una transición que violaba la invariancia CP. Así, como resultado de un experimento, se abandonó una supuesta ley de la naturaleza, aun cuando el verdadero origen de la violación de la invariancia CP en el sistema de kaones carece actualmente de explicación y se considera uno de los grandes misterios de la física.



3. MASAS de los cinco quarks conocidos, indicadas en millones de electronvolt (MeV). Las masas de los quarks de las sucesivas familias difieren en un orden de magnitud, aproximadamente. Los límites experimentales acerca del quark "verdad" colocan su masa por encima de los 50 GeV (miles de millones de electronvolt); los límites referentes a la cuarta familia de quarks cifran su masa por encima de 41 GeV.

Mezcla de sabores

Por inexplicable que sea la violación de CP, su intensidad puede relacionarse con las probabilidades de transición quark-quark. Los quarks suelen transformarse en otros miembros de su propia familia; verbigracia, el quark encanto se desintegrará en un quark extrañeza y un *W* virtual. Para que se presente la violación de CP, los quarks deben ser capaces de transformarse en miembros de otras familias, en un proceso de mezcla de sabores (se llama así porque las familias de quarks se caracterizan caprichosamente como si tuvieran diferentes sabores). Además, se puede demostrar que un modelo estándar que poseyera dos familias no podría permitir la violación de CP en el sistema de kaones neutros; son necesarias por lo menos tres familias de quarks. Lo cierto es que la existencia de la violación de CP fue la primera prueba de una tercera familia de quarks. La intensidad de la violación de CP depende de la probabilidad con la que un quark de una familia se puede transformar en un quark de otra, es decir, de la cantidad de mezcla.

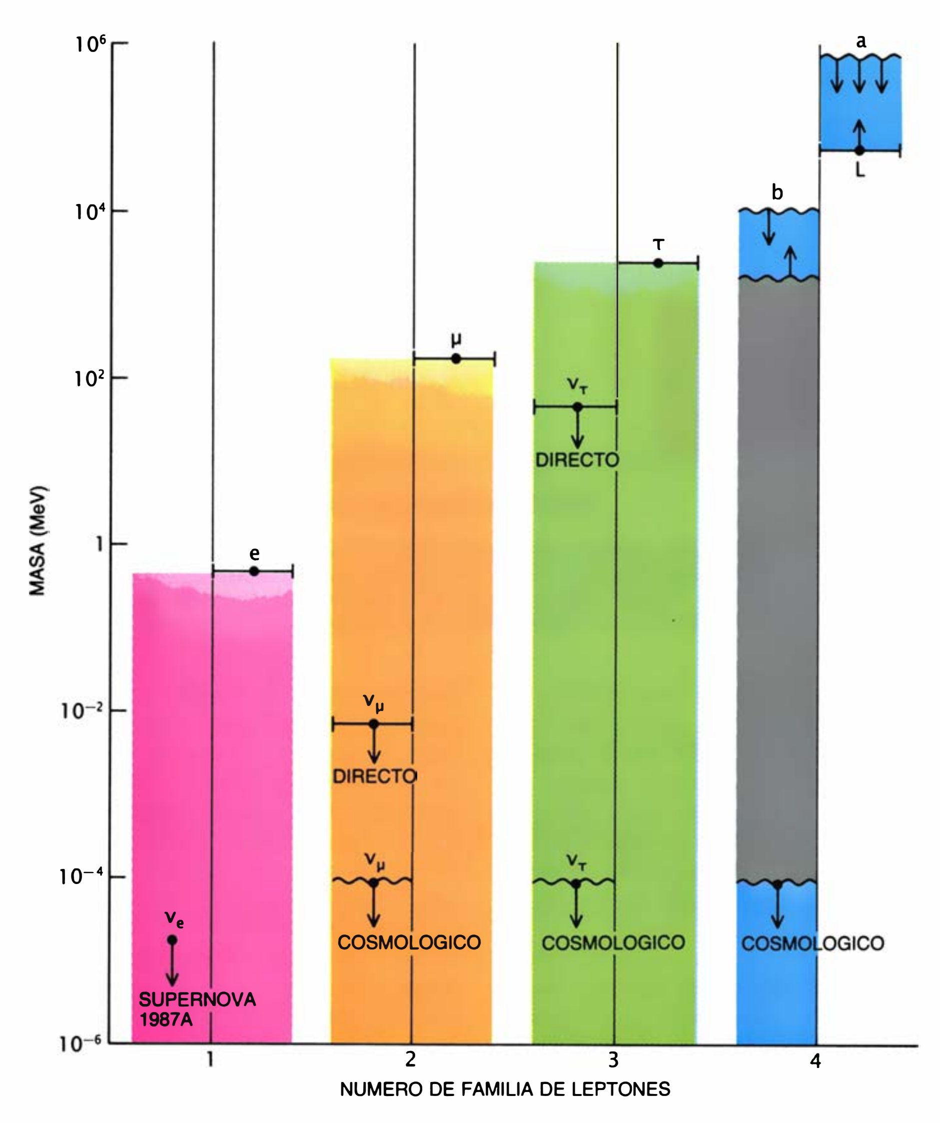
Una cuarta familia condicionaría la cantidad de mezcla de sabores, permitiendo más transiciones quark-quark. Físicos del sincrotrón de electrones alemán (DESY) y del CERN acaban de descubrir que la mezcla de sabores en el sistema de mesones *B* es 20 veces mayor que lo esperado. El mesón *B* se denomina así porque está formado por un quark belleza y otro quark, por ejemplo, un quark antiabajo. En el proceso de mezcla, el mesón *B* se transforma en un anti-*B*, lo que exige que el quark belleza se transforme en un abajo y el antiabajo en un antibelleza [*véase la figura 6*]. Obsérvese que, como en el sistema de kaones, se trata de transiciones de mezcla de sabores. El ritmo de formación de la mezcla depende de todos los quarks existentes, así como de sus masas: cuantos más quarks haya, más mezcla se espera. El hecho de que la mezcla descubierta en el DESY fuera mucho mayor que lo esperado podría abogar por la implicación, en ese proceso, de una cuarta familia de quarks. Ahora bien, desconociéndose la masa del quark verdad, pudiera ocurrir que los resultados se justificaran con las tres familias de quarks.

La mezcla del mesón *B* puede proporcionar también una pista sobre el origen de la propia violación de CP, que hasta ahora sólo se ha observado en el sistema de kaones neutros. La mezcla de sabores constituye una condición necesaria para la violación de

CP, pero no suficiente. Aunque la violación de CP no se ha detectado en los mesones *B*, el propio tamaño de la mezcla ha motivado que algunos investigadores se sientan optimistas y esperen que la observación de la violación de CP en el sistema de mesones *B* no tardará en llegar. Si se descubre que la violación de CP resulta de análoga magnitud, será poco probable que el modelo estándar con tres familias se acomode al resultado (a menos que la masa del quark verdadero sea inesperadamente grande), por lo que se tendrá que apelar a una cuarta familia de quarks.

Esa afirmación se podrá someter a contrastación en un futuro próximo. Las colisiones protón-protón en un acelerador pueden producir pares de mesones *B* y antimesones *B* que, a su vez, se desintegrarán en entidades que contengan dos leptones cargados. Estos mesones cargados pueden ser electrones o positrones. Si se conserva CP, los ritmos con los que los mesones se desintegran en electrones y en positrones deberán ser iguales; si se viola CP, los ritmos serán distintos. El ensayo en cuestión se mostrará sumamente sensible a la existencia de una cuarta familia de quarks. Una observación de la violación de CP relacionaría unívocamente la violación de CP con las probabilidades de transición de los quarks y podría conducir a la identificación del origen fundamental de la violación de CP en la naturaleza.

La importancia que reviste la detección de la violación de la paridad de carga en la desintegración de los mesones *B* está conduciendo al diseño de un nuevo tipo de colisionador electrón-positrón: el colisionador lineal productor de mesones *B*. Se está investigando sobre las posibilidades de esa máquina en Estados Unidos (UCLA) y en Italia. Se pretende producir más de mil millones de quarks y antiquarks "belleza" por año.



4. ESPECTRO DE MASAS DE LOS LEPTONES, gracias al cual se pone de manifiesto que las masas de los leptones cargados, como las de los quarks, guardan una ordenación jerárquica: la masa del tauón viene a ser un orden de magnitud mayor que la masa del muon, que, a su vez, es unos dos órdenes de magnitud mayor que la masa del electrón. Los límites referentes a la masa del cuarto leptón cargado (*L*) exigen que ésta sea mayor que 41 GeV. La diferencia de masas entre los bosones vectoriales *W* y Z^0 proporciona un límite superior (*arriba, a la derecha*). Desconocemos las masas de los tres neutrinos. Los límites superiores deducidos de la supernova 1987A cifran la masa del neutrino electrónico por debajo de 16 electronvolt. La exigencia de que ningún neutrino posea masa suficiente para frenar de manera apreciable la expansión del universo establece un límite superior "cosmológico" de 65 eV para todos los neutrinos. La zona gris (*derecha*) está excluida por la teoría; el límite *b*, en esa misma columna, se deduce de los análisis de materia oculta.

Modelo de Fritzsch

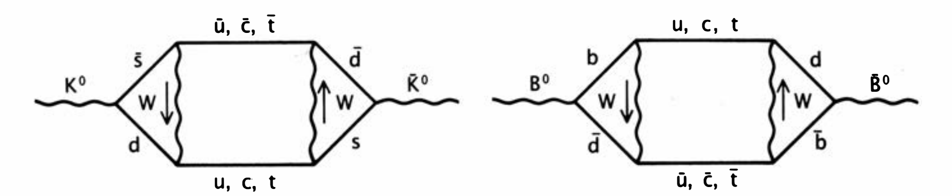
El otro gran misterio que puede resolverse apelando a una cuarta familia es el relativo al origen de la jerarquía de masas entre las partículas. Se confía en que la cuarta familia constituya un caso especial y que las masas de las tres primeras familias se "generen" mediante interacciones con la cuarta. Esta idea, descrita por Harald Fritzsch, de la Universidad de Munich, liga la diferencia de masas entre los quarks con una supuesta relación entre la masa de los quarks y las transiciones entre quarks. Hasta ahora, los datos experimentales encajan en el modelo de Fritzsch.

El profesor muniqués sugiere también que el cociente de masas de los dos nuevos quarks será cuatro. En tal guarismo se cifraría el cociente de los cuadrados de las cargas de los quarks $-(2/3)^2/(-1/3)^2-$ que habría que esperar si la interacción electromagnética originara las masas de los quarks.

Varios físicos teóricos consideran que debe existir un nuevo quark en la vecindad de 246 GeV. Entre sus características distintivas, predice el modelo estándar que, a energías suficientemente altas, las fuerzas empiezan a unificarse. En particular, la fuerza electromagnética y las interacciones nucleares débiles y fuertes deben convertirse en una sola fuerza de "gran unificación". Las fuerzas deben unificarse a la altísima energía de 10^{15} GeV, fuera del alcance de lo que nunca se logrará en un acelerador terrestre. La extrapolación de los valores medidos de los parámetros fundamentales a bajas energías hasta la escala de energía de gran unificación necesitaría, para ser válida, la existencia de un quark dotado de gran masa.

Más aún: resulta que los valores medidos de las masas del *W* y el Z^0 pueden poner límites a la diferencia de masas entre los dos miembros de la cuarta familia de quarks. Los datos actuales in-

dican que la diferencia de masas entre los dos quarks de la cuarta familia debe ser inferior a 180 GeV. Por tanto, si existe un miembro de la cuarta familia en las proximidades de 246 GeV, la masa del otro miembro se cifrará en 426 GeV, o en torno a 66 GeV, cayendo este último valor dentro del intervalo que los aceleradores analizarán en un futuro próximo.



5. DIAGRAMAS DE FEYNMAN: ilustran la mezcla de sabores para el sistema de kaones (K^0) (*diagrama de la izquierda*) y un sistema de mesones *B* (*diagrama de la derecha*). La mezcla tiene lugar cuando un K^0, formado por un quark antiextraño ($\bar{s}$) y un quark abajo (*d*), se convierte en un antikaón ($\bar{K}^0$). Ello exige que el quark antiextraño ($\bar{s}$) se convierta en un $\bar{d}$ y el *d* en un *s*. En este sistema de mesones *B*, formado por un *b* y un $\bar{d}$, el *b* debe transformarse en un quark abajo (*d*) y el $\bar{d}$ en un $\bar{b}$. Estas transiciones se denominan transiciones de cruce de familias o de mezcla de sabores. Tal mezcla es necesaria para la violación CP.

Masas de neutrinos

Admitamos que existe la cuarta familia de quarks. ¿Cómo son sus leptones asociados? Aquí, el interés se centra en las masas de los neutrinos. Los límites cosmológicos mencionados antes exigen que los neutrinos tengan una masa por debajo de 65 eV, lo que incluye el cero. Cuando se compara con la masa del *W*, se obtiene un cociente de masas de mil millones. ¿Qué explicación tiene la masa increíblemente pequeña del neutrino? Hay dos puntos de vista distintos: o bien la masa del neutrino es cero en virtud de un principio fundamental aún sin descubrir, o bien la pequeña masa del neutrino es consecuencia de otra masa muy grande.

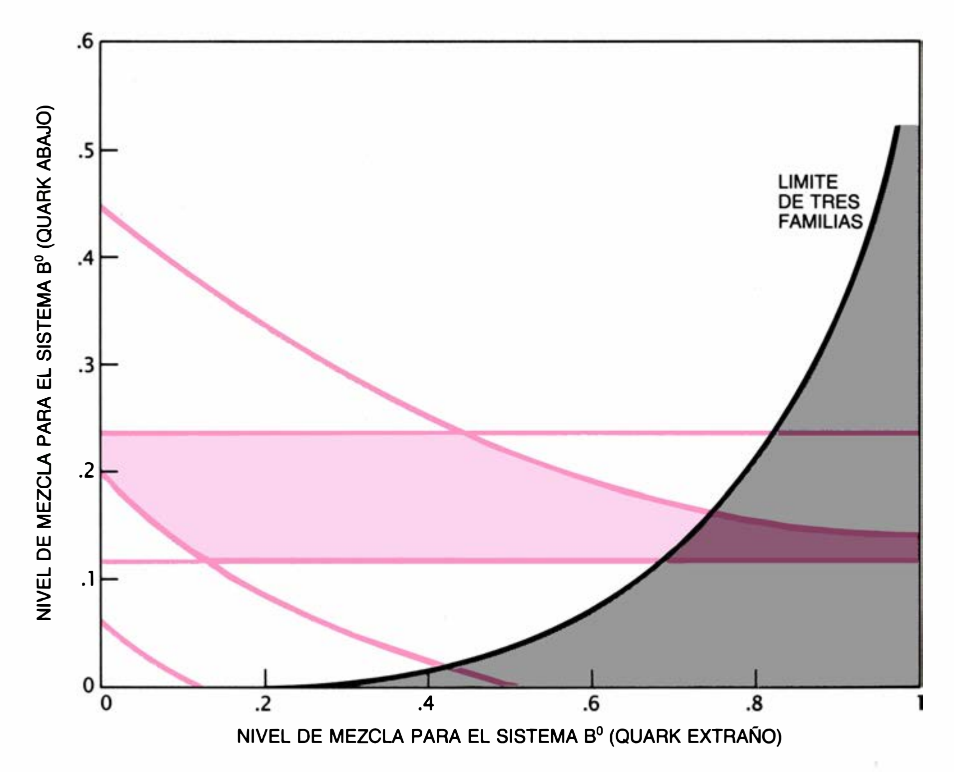
El último punto de vista depende del mecanismo de la palanca, propuesto por Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, Pierre M. Ramond, de la Universidad de Florida, y Richard C. Slansky, del Laboratorio Nacional de Los Alamos. El inconveniente del mecanismo de la palanca estriba en que se trata de un mecanismo *ad hoc*; su ventaja, su sencillez. Supone que la masa del neutrino electrónico es igual al cuadrado de la masa del electrón dividida por alguna escala de masas grande y desconocida. La masa del electrón está fijada. Por tanto, cuanto mayor sea la escala de masas desconocida, menor será la masa del neutrino; de ahí el nombre de palanca.

Como ejemplo de referencia, los límites de la supernova colocan la masa del neutrino electrónico a menos de 16 eV. El cuadrado de la masa del electrón es de unos 250×10^{-9} GeV^2. La solución de la ecuación de la palanca exige entonces que la escala de masas desconocida sea superior a 16 GeV. Cuando se cifra la masa del tau en 1,8 GeV y el límite superior cosmológico de la masa del neutrino tauónico en 65 eV, se encuentra un límite inferior más estricto de 5×10^7 GeV.

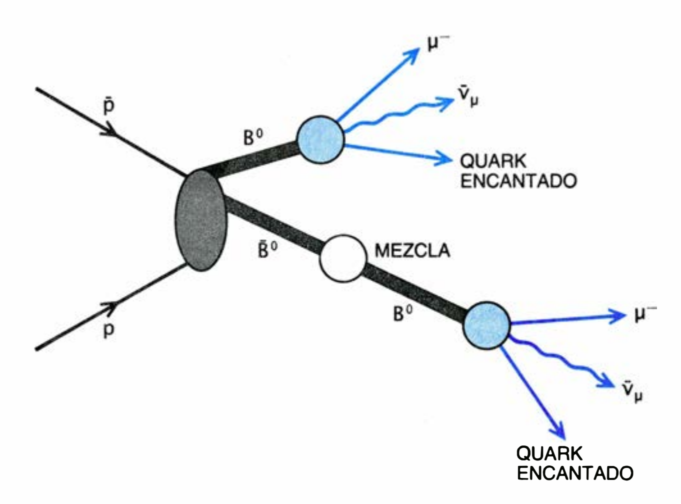
En virtud del mecanismo de la palanca, se advierte, pues, que la increíblemente pequeña masa del neutrino es la consecuencia de una escala de masas mucho mayor que lo alcanzable mediante nuestros aceleradores de haces colisionantes. Si el mecanismo es correcto, estas escalas de masas deben estar asociadas a partículas nuevas; quizás un cuarto quark o leptón. El mecanismo de la palanca tendría entonces también implicaciones cosmológicas: aumenta la posibilidad de que el cuarto neutrino proporcione la "masa oculta", necesaria para cerrar el universo.

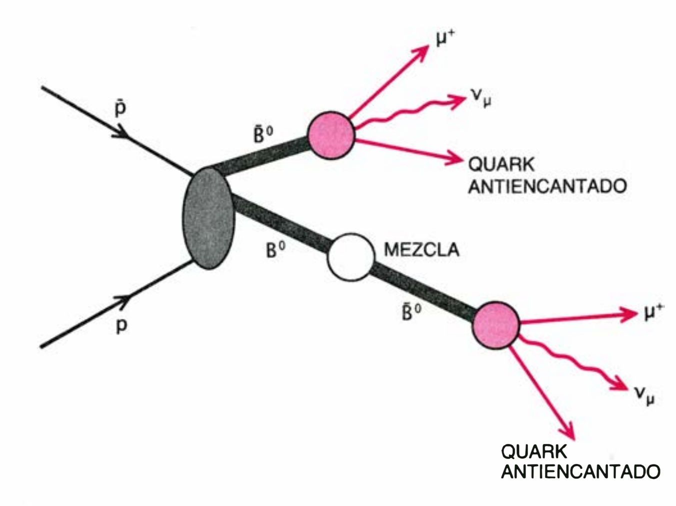
Los actuales prejuicios teóricos exigen que la densidad de masa del universo sea justo la suficiente para frenar la actual expansión y hacer que el universo colapse de nuevo, en cuyo caso se diría que el universo es "cerrado". Pero los datos disponibles revelan que la densidad de masa del universo observada se halla sólo entre el 10 y el 20 por ciento de ese valor crítico. De ahí que los astrónomos estén actualmente dedicados a una búsqueda generalizada de la "masa oculta".

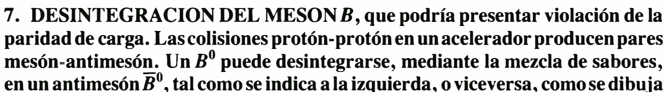
Un neutrino que proporcionara la masa oculta no podría estar dotado de gran masa. Los neutrinos abundan más que los propios fotones —varios miles de millones por cada protón, electrón y neutrón—; si algún tipo de neutrino tuviera una masa igual al valor de 65 eV, ello bastaría para cerrar el universo. Si la masa del neutrino estuviera muy por encima de tal valor, la fuerza gravitatoria resultante sería suficiente para frenar de manera apreciable el ritmo observado de expansión del universo. El hecho de que no se aprecie ese



6. LOS EXPERIMENTOS DE MEZCLA pueden aportar pruebas de la existencia de una cuarta familia de quarks. Los mesones B^0 aparecen en dos variedades, ya sea un $b\bar{d}$, tal como en la ilustración precedente, o un $b\bar{s}$. Ambos tipos experimentan la mezcla de sabores, es decir, se transforman en sus antipartículas. Recientemente, cinco experimentos (*curvas de color*) realizados en los laboratorios del CERN, DESY, SLAC y la Universidad de Cornell han mostrado que la mezcla era mucho mayor que lo que se esperaba. El área coloreada, delimitada por los resultados experimentales, señala los valores probables del nivel de mezcla de las dos clases de partículas B^0. La mayor parte de dicha área trasciende el límite permitido por el modelo estándar con tres familias e indica que una cuarta familia podría contribuir a la mezcla de partículas.





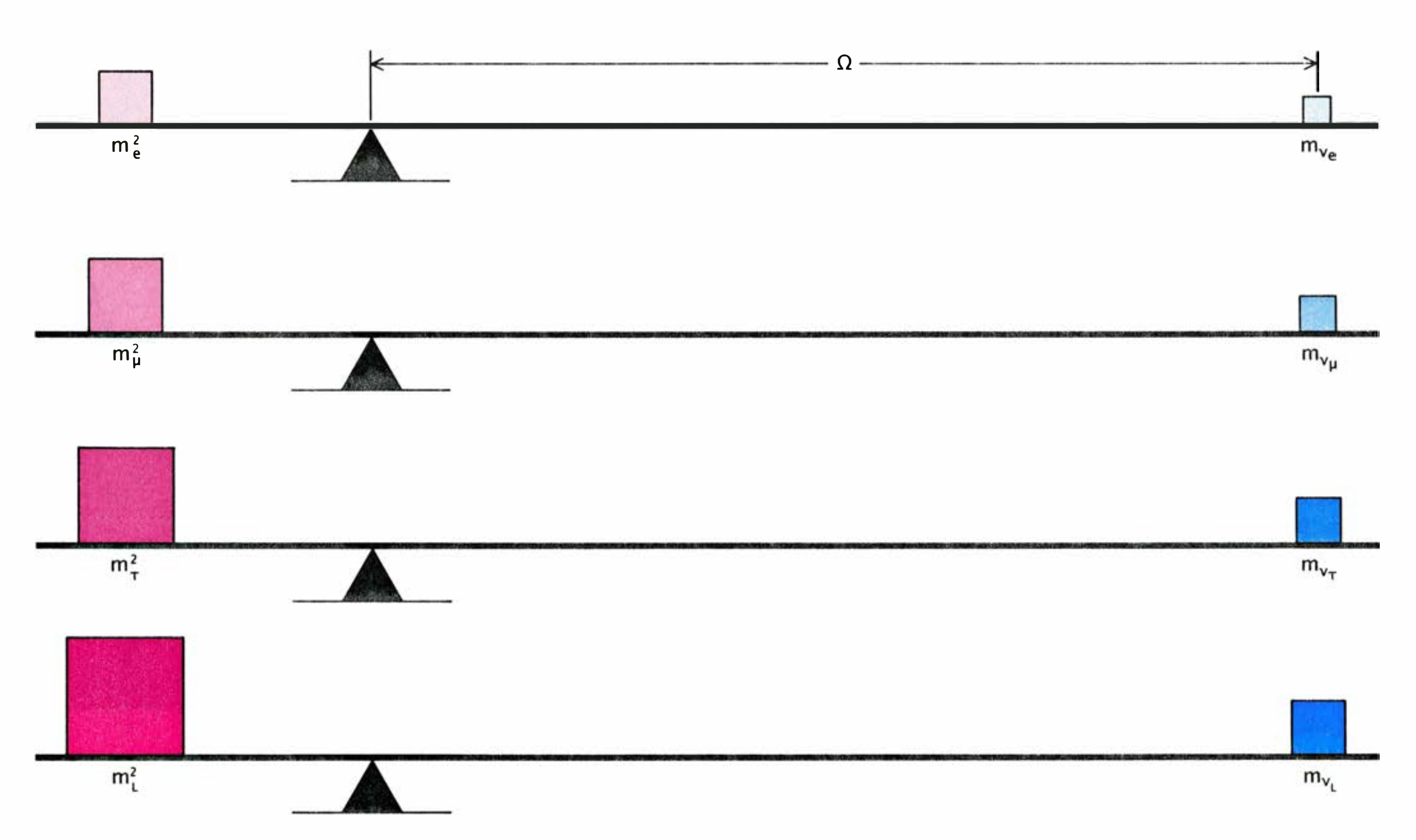


7. DESINTEGRACION DEL MESON *B*, que podría presentar violación de la paridad de carga. Las colisiones protón-protón en un acelerador producen pares mesón-antimesón. Un B^0 puede desintegrarse, mediante la mezcla de sabores, en un antimesón $\overline{B}^0$, tal como se indica a la izquierda, o viceversa, como se dibuja a la derecha. Estas partículas se desintegrarían luego en muones, antimuones, quarks y neutrinos. Si el ritmo de desintegración en muones (*izquierda*) difiriera del ritmo de desintegración en antimuones (*derecha*), se violaría la paridad de la carga. (Adviértase que la carga se conserva; súmense, pues, los diagramas.)

efecto ha conducido a la mayoría de los físicos a aceptar, por límite superior, los 65 eV.

De los experimentos realizados se deduce que cualquier cuarto leptón cargado presentará una masa por encima de 41 GeV. Aceptando este número para la masa del leptón cargado y los 65 eV para la masa del cuarto neutrino, el mecanismo de la palanca ofrece un valor de 2,5 × 10^{10} GeV para la escala de masa desconocida. Suponiendo que esta única escala de masas generara la masa de todos los neutrinos, se calcula, por el mecanismo de la palanca, que las masas de los neutrinos no llegarán a 10^{-8} eV, 4 × 10^{-4} eV y 0,1 eV, para el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico, respectivamente. En la hipótesis de que ese razonamiento fuera correcto, el cuarto neutrino podría proporcionar la masa que falta, aunque los tres neutrinos ya conocidos serían demasiado ligeros para ejercer efecto alguno.

Tales argumentos para la existencia de una cuarta familia de quarks y lep-



8. PROPONE EL MECANISMO DE LA PALANCA que la masa de cada neutrino (m_ν) está relacionada con la masa de su leptón cargado asociado (*m*) mediante la fórmula $m_\nu = m^2/\Omega$; Ω es una escala de masas desconocida que se ilustra aquí mediante el brazo de la palanca. Se sabe, por ejemplo, que la masa del neutrino electrónico es menor que 16 electronvolt y que la masa del electrón es de 0,5 megaelectronvolt; por tanto, la ecuación de la palanca exige que Ω sea, por lo menos, 16 gigaelectronvolt. La masa del tauón es 1,8 giraelectronvolt y el límite cosmológico acerca del neutrino tauónico lo hace más ligero que 65 electronvolt. La ecuación de la palanca da, con estos valores, para Ω el límite inferior más estricto de 5 × 10^7 gigaelectronvolt. Si Ω se relaciona con una masa muy grande, de un cuarto leptón, el mecanismo de la palanca indica cómo esa masa notable podría generar las masas, muy reducidas, de los neutrinos.

tones se mueven, hay que admitirlo, en el terreno de la lucubración. Pero se ha empezado ya a trabajar en la búsqueda directa. El propio autor y Carlo Rubbia, del CERN, sugirieron una técnica, que utiliza la desintegración de las partículas *W*, para descubrir un posible cuarto leptón cargado, o, por lo menos, poner un límite a su masa. Experimentos recientes del CERN dan un límite de 41 GeV. Observemos que este valor se halla entre uno y dos órdenes de magnitud por encima del tauón, que es lo que cabría esperar a partir de la jerarquía de masas analizada antes. Si la masa del próximo quark o leptón cargado es menor que 70 GeV, las actuales máquinas podrían detectarlo en un futuro próximo. De lo contrario, los físicos tendrían que esperar al supercolisionador superconductor o al gran colisionador de hadrones que el CERN tiene en fase de anteproyecto.

Experimentos en marcha

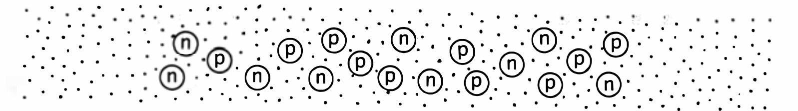
Podría pensarse que, si se descubre una cuarta familia de quarks y leptones, una quinta estaría mucho más lejos. El problema se lo han planteado cosmólogos y físicos de partículas, dentro de su actual empeño por contar las familias de neutrinos.

Desde un punto de vista cosmológico, el número de familias de neutrinos ejerce un profundo efecto en la producción de isótopos ligeros durante el proceso de nucleosíntesis primordial que se desarrolló en los primeros minutos subsiguientes a la gran explosión. La abundancia resultante de estos isótopos, en particular de helio y de deuterio, depende de la velocidad con que el universo se expandió en relación con el ritmo de producción de isótopos en las reacciones nucleares. A su vez, la velocidad de expansión del universo depende del número de clases de partículas existentes, incluidas las familias de neutrinos. Cuantas más familias de neutrinos haya, más deprisa se expandirá el universo y más helio se producirá. Comparando el helio producido (mediante cálculos de nucleosíntesis) con los límites superiores observados, se acota el número de familias de neutrinos posibles. Pues bien, esas consideraciones limitan el número de familias de neutrinos a cuatro o a cinco. En la hipótesis de que el emparejamiento de quarks y leptones del modelo estándar continúe en las familias superiores, el número de familias de quarks se limita entonces a cuatro o bien cinco.

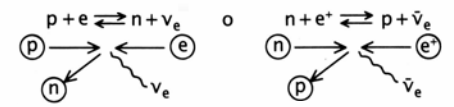
Dichas restricciones cosmológicas,

PRODUCCION DE HELIO EN LA GRAN EXPLOSION Y FAMILIAS DE NEUTRINOS

1. Supongamos que el universo sólo estuviera formado por protones (*p*) y neutrones (*n*), con un fondo mucho mayor de electrones (e^-), positrones (e^+), neutrinos y antineutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ, $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$) y fotones (γ), todos los cuales se dibujan mediante puntos. A tiempos mucho menores que el segundo después de la gran explosión, y a temperaturas por encima de los 10^{10} grados Kelvin, *n* y *p* aparecían en números casi iguales:



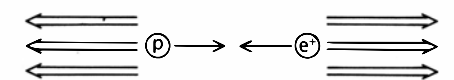
2. Los neutrones y protones se transforman constantemente entre sí mediante las denominadas reacciones nucleares débiles:



3. Por ser los neutrones ligeramente más pesados que los protones, resultan, desde el punto de vista energético, más difíciles de producir, y así las transmutaciones *n-p* del paso 2) generan más protones. A medida que el universo se expande y enfría, hay cada vez menos energía disponible para producir neutrones, de manera que las reacciones débiles dan aún más protones. Un segundo después de la gran explosión, y a una temperatura aproximada de 10^{10} grados Kelvin, los protones superan a los neutrones en una proporción de unos cinco a uno:

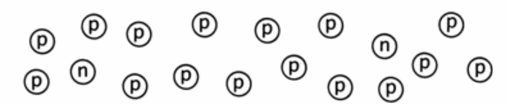


4. En este instante, el ritmo de expansión del universo supera los ritmos cada vez más lentos de las reacciones débiles: las colisiones entre partículas cesan:

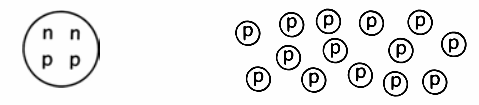


No se convierten más neutrones en protones; la razón 1:5 se "congela".

5. Los neutrones son radiactivos y se desintegran en protones. La vida media del neutrón es de unos 15 minutos; así pues, transcurridos unos tres minutos, un tercio aproximadamente de los neutrones se han desintegrado en protones, dejando un *n* por cada ocho *p*:



6. Tres minutos después de la gran explosión, la temperatura ha bajado a unos 10^9 grados Kelvin, suficiente para que el núcleo del isótopo deuterio (*n,p*) pueda permanecer ligado. El deuterio se convierte entonces en helio (2*n*,2*p*). Como el helio precisa números iguales de *p* y de *n*, la formación de helio cesa cuando se han utilizado todos los neutrones disponibles:



Neutrones y protones tienen aproximadamente la misma masa; por tanto, 4/16, un 25 por ciento, de la masa del universo queda en forma de helio y un 75 por ciento queda en forma de protones (núcleos de hidrógeno).

7. Cuantas más familias de neutrinos haya, mayor será el ritmo de expansión del universo. Por tanto, el paso 4) ocurre antes, y a temperatura más elevada, cuando hay más neutrones; los pasos 5) y 6) se desarrollan en presencia de más neutrones, lo que da lugar a la formación de más helio. Sin embargo, las observaciones astronómicas limitan el helio a menos del 25 por ciento de la masa del universo. Ello indica que no hay más de cuatro familias de neutrinos.

impuestas sobre las clases de partículas, se han venido recibiendo tradicionalmente con grandes reservas por parte de los expertos en física subatómica. Pero coincide que los experimentos de laboratorio están llegando a la misma conclusión. En esos ensayos se emplea la partícula Z^0, que es capaz de desintegrarse en todas las familias de neutrinos existentes. Cuantas más familias de neutrinos haya, antes se desintegrará Z^0. Por tanto, midiendo la vida media de Z^0, los físicos pueden determinar el número de familias de neutrinos existentes en la naturaleza. Los resultados provisionales de SLAC, CERN y DESY han limitado ya el número de familias de neutrinos a cinco. Los refinamientos acabarán por dar un número exacto; no sólo un límite superior, sino también una prueba directa a favor o en contra de una cuarta familia de quarks y leptones.

Si se establece una nueva familia, más allá de la verdad y la belleza, los físicos habrán de plantearse varias cuestiones. ¿Por qué cuatro? ¿Por qué posee tanta masa la cuarta familia? ¿Por qué es también cuatro (un número par) el número de dimensiones del espacio-tiempo? ¿Es éste un resultado de la teoría de supercuerdas, que especifica el número de dimensiones posibles?

Preguntas de ese tenor pueden encadenarse infinitamente. Lo único que la ciencia puede hacer es reducir muchos problemas a unos cuantos. Si la introducción de una cuarta familia de quarks y leptones explica la distribución de masas de las tres primeras familias, las probabilidades de transición, la masa oculta y la naturaleza de la violación de la paridad de carga, habrá prestado un gran servicio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WEAK-INTERACTION MIXING IN THE SIX-QUARK THEORY. H. Fritzsch en *Physics Letters*, vol. 73B, n.º 3, págs. 317-322; 27 de febrero de 1978.

SEARCH FOR HIGH-MASS SEQUENTIAL LEPTONS THROUGH THE CHANGE OF CHARGE ASYMMETRY IN $W^\pm \rightarrow l^\pm$ + (NEUTRINOS) DECAY. D. B. Cline y C. Rubbia en *Physics Letters*, vol. 127B, n.º 3, 4, págs. 277-280; 28 de julio de 1983.

PRIMORDIAL NUCLEOSYNTHESIS: A CRITICAL COMPARISON OF THEORY AND OBSERVATION. J. Yang, M. S. Turner, G. Steigman, D. N. Schramm y K. A. Olive en *The Astrophysical Journal*, vol. 281, n.º 2, parte 1, págs. 493-511; 15 de junio de 1984.

THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE FOURTH FAMILY OF QUARKS AND LEPTONS. En *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 518; 1988.

Medicamentos fotoactivados

Un paciente ingiere una sustancia inerte. La retiramos del organismo en una pequeña cantidad de sangre y la activamos exponiéndola a la luz. ¿Resultado? Un eficaz tratamiento para un cáncer obstinado

Richard L. Edelson

Una de las metas más ansiadas en medicina es el desarrollo de agentes terapéuticos dotados de gran especificidad: agentes que sólo ataquen el tejido elegido. Muchos antibióticos se aproximan a ese ideal. Debido a las diferencias que presentan las células bacterianas y las humanas, los antibióticos destruyen el invasor sin dañar los tejidos humanos. Sin embargo, en el caso del cáncer y de las alteraciones autoinmunitarias (en las que el sistema inmunitario ataca tejidos normales), resulta difícil lograr tal discriminación. En ambos tipos de alteraciones, la causa de la lesión hística no es una bacteria ni un virus, sino el incorrecto funcionamiento de las células del propio organismo. Está claro que la distinción entre células enfermas y sanas no es tarea fácil y, por ello, pocas terapias combaten con eficacia las enfermedades autoinmunitarias; las que existen contra el cáncer a menudo conllevan efectos colaterales que las desaconsejan.

Ha comenzado a rendir beneficios significativos la terapia que emplea medicamentos fotoactivados, es decir, fármacos que se activan por la luz. Esas sustancias son inertes mientras no se expongan a una radiación de longitud de onda adecuada; el clínico puede atacar así sólo los tejidos expuestos, simultáneamente, a la droga y a la luz. En particular, para tratar el linfoma cutáneo de células *T* (CTCL), el autor y sus colegas han utilizado 8-MOP, sustancia que ya conocían los antiguos egipcios. El CTCL es un cáncer de los glóbulos blancos de mal pronóstico. Administrando 8-MOP a los pacientes y sometiendo luego sus glóbulos blancos a radiación de la longitud de onda adecuada, hemos logrado resultados sorprendentes. El procedimiento, que ha sido ya aprobado por la administración estadounidense para tratar el CTCL, puede constituir la avanzadilla de una amplia gama de terapias basadas en medicamentos fotoactivados.

En último término, el trabajo de nuestro grupo reunió dos líneas experimentales que inicialmente distaban considerablemente: una sobre los cánceres de las células sanguíneas y otra (desarrollada por Irun R. Cohen, del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, y sus colaboradores) sobre las enfermedades autoinmunitarias. Ambos campos de investigación compartían varios elementos. En primer lugar, tanto los cánceres estudiados por nosotros como las alteraciones autoinmunitarias investigadas por Cohen derivaban de trastornos de los linfocitos *T*, glóbulos blancos que desempeñan un papel clave en la orquestación de la respuesta inmunitaria. (En el SIDA está afectado precisamente un subconjunto de células *T*.)

Asimismo, los médicos empeñados en la lucha contra ambos males topaban con problemas análogos. Por regla general, la quimioterapia anticancerosa se dirige contra las células que se multiplican rápidamente. La tolerancia del paciente a esa terapia está limitada por la toxicidad del procedimiento: afecta a diversos tejidos normales, como el revestimiento intestinal, la médula ósea y el folículo piloso, cuyas células se dividen con gran rapidez. Los pacientes sometidos a quimioterapia anticancerosa suelen padecer anemia (resultado del descenso de la producción de glóbulos rojos por la médula ósea), hemorragias (por la menor producción de plaquetas, necesarias para la coagulación) e infecciones (por el descenso de la producción de glóbulos blancos), así como hemorragias intestinales y pérdida del cabello.

Igual que el quimioterapeuta trata de incidir selectivamente sobre las células malignas, el inmunólogo clínico pretende detener el crecimiento de las células inmunológicas de reacciones anormales. En muchos casos esas células anómalas son linfocitos *T*. Por ejemplo, en la artritis reumatoide, una agresiva enfermedad que afecta principalmente a las mujeres jóvenes, los linfocitos atacan las articulaciones como si esos tejidos normales del cuerpo fueran invasores patógenos. Para eliminar los linfocitos destructores suelen utilizarse derivados de la cortisona. Pero los derivados corticoides no están libres de efectos colaterales: hipertensión, diabetes, cataratas, degeneración ósea y susceptibilidad a infecciones que una persona sana habría eludido sin mayores complicaciones.

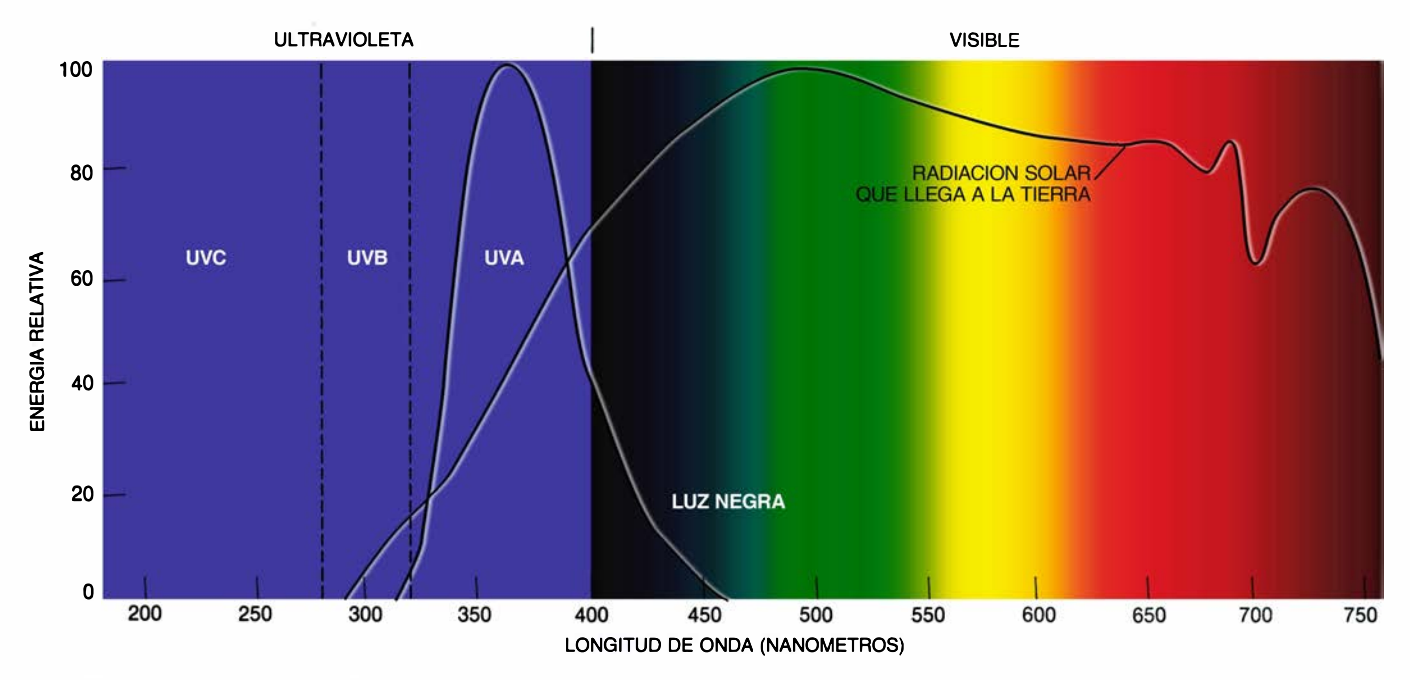
Aunque sabemos ya que existe un misterioso solapamiento de los problemas del inmunólogo con los del oncólogo, el autor y sus colegas centraron, en un principio, su atención en la luz y el cáncer. Desde hacía tiempo se reconocía la función terapéutica de la luz en el tratamiento de la enfermedad. En 1903 Niels R. Finsen recibió el premio Nobel por descubrir que las lesiones de la piel que aparecían en la tuberculosis se resolvían frecuentemente después de exponerlas a la luz ultravioleta. La medicación indicada para la tuberculosis son los antibióticos, pero la fototerapia ocupa un puesto central en el tratamiento de diversas afecciones, como psoriasis, acné y ciertas formas de ictericia del recién nacido.

RICHARD L. EDELSON es profesor y jefe del departamento de dermatología de la facultad de medicina de la Universidad de Yale. Sus investigaciones se centran en el estudio de las células *T* humanas y de sus procesos malignos. Este es el segundo artículo que publica en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.



1. ANTES DEL TRATAMIENTO. Manos de un paciente con linfoma cutáneo de células *T* (CTCL), un cáncer que se origina en los linfocitos *T*, un tipo de glóbulos blancos. Las células *T* se encuentran en gran número en la piel; su proliferación anormal confiere el aspecto distorsionado que se muestra aquí. En última instancia, las células malignas invaden órganos internos. El CTCL, afección maligna de mal pronóstico, es resistente a las terapias anticancerosas convencionales.

2. DESPUES DEL TRATAMIENTO con una droga fotoactivada, la 8-MOP, las mismas manos que aparecen en la fotografía superior. La 8-MOP es inerte hasta que se expone a la radiación ultravioleta de cierta longitud de onda. Entonces se une al ADN, lo que daña las células que se multiplican rápidamente, como es el caso de las células *T* cancerosas. El tratamiento para el CTCL con exposición a una fuente de luz, diseñado por el autor, se conoce como fotoferesis.



3. ESPECTRO ELECTROMAGNETICO; comprende tanto radiaciones visibles como invisibles. Entre las formas invisibles se encuentra la radiación ultravioleta. Los rayos ultravioleta B (UVB) son la causa de las quemaduras del sol. Los ultravioleta A (UVA) abarcan longitudes de onda que activan el 8-MOP.

Mucho antes que Finsen, en el antiguo Egipto se descubrió que una planta común poseía propiedades medicinales despertadas por la luz. *Ammi majus* es una hierba que crece en las orillas del Nilo. Los médicos de entonces observaron que, poco después de comer la planta, la gente se encontraba especialmente predispuesta a sufrir quemaduras por el sol. Aprovecharon esa propiedad para tratar el vitíligo, afección cutánea en la que la piel aparece manchada porque algunas zonas pierden la pigmentación. Según se sabe ahora, los principios activos de *Ammi* son psoralenos, la clase de compuestos a la que pertenece el 8-MOP (cuyo nombre técnico es 8-metoxipsoraleno). En la actualidad, el 8-MOP, que constituye tanto una droga anticancerosa como un modulador inmunológico, se utiliza como prototipo para el desarrollo de drogas medicamentosas susceptibles de fotoactivación.

Los psoralenos, un grupo extraordinario de compuestos, se han convertido en centro de nuestra atención. Los psolarenos se encuentran también, en pequeñas cantidades, en los higos, limas, raíces de la chirivía y otras muchas frutas y hortalizas. Tras ingerirlos por vía oral, se absorben en el tracto intestinal y alcanzan niveles máximos en la sangre y otros tejidos al cabo de una a cuatro horas; durante las siguientes 24 horas se excretan casi en su totalidad. La propiedad más espectacular de esas sustancias es su capacidad de absorber luz ultravioleta y que ésta las active. Antes de su exposición a esa radiación las moléculas son inertes, pero luego se unen al ADN, trabando firmemente entre sí las cadenas del ácido nucleico. Ahora bien, la replicación del ADN exige que las cadenas se separen, por cuya razón los psoralenos infligen un grave perjuicio a las células que se dividen con rapidez.

Los psoralenos poseen características que les confieren especial idoneidad para su aplicación clínica. Extremadamente inocuos en ausencia de luz, una vez activados suspenden enérgicamente la función del ADN. Además, el tipo de radiación que los activa, la ultravioleta A, o UVA, atraviesa fácilmente el vidrio y ciertos plásticos; no ocurre eso con luz la ultravioleta B (la causa de las quemaduras solares) que dichos materiales filtran. Esa propiedad reviste gran interés en el diseño del equipo de trabajo. Quizá sea más importante aún que, al exponer los psoralenos a la UVA, sólo permanecen activos durante unas millonésimas de segundo, tiempo suficiente para que se produzca la reacción química pero lo bastante breve para que, cesada la reacción, la sustancia revierta inmediatamente a su forma inerte. En resumidas cuentas, los psoralenos ofrecen al clínico una forma de terapia altamente específica: fármacos dotados de gran potencia sólo cuando se someten a la radiación adecuada.

Curiosamente, la historia médica moderna de los psoralenos prolonga, en cierto sentido, sin solución de continuidad, su uso terapéutico en el antiguo Egipto. Debemos los primeros estudios modernos sobre el 8-MOP a Abdel M. El Mofty, de la Universidad de El Cairo. El Mofty confirmó, en la década de 1940, lo que sus antiguos antepasados ya sabían: que la ingestión de una preparación de la planta *Ammi* sumada a la exposición a la luz solar combatía eficazmente el vitíligo. Sus resultados interesaron mucho a un grupo de la facultad de medicina de Michigan, encabezado por Aaron B. Lerner y Thomas B. Fitzpatrick, que realizó los primeros estudios con 8-MOP purificado. Los trabajos, desarrollados durante los años cincuenta, probaron que la droga era bastante segura: la proporción entre la dosis máxima inocua y la dosis requerida para tener un efecto clínico era muy elevada.

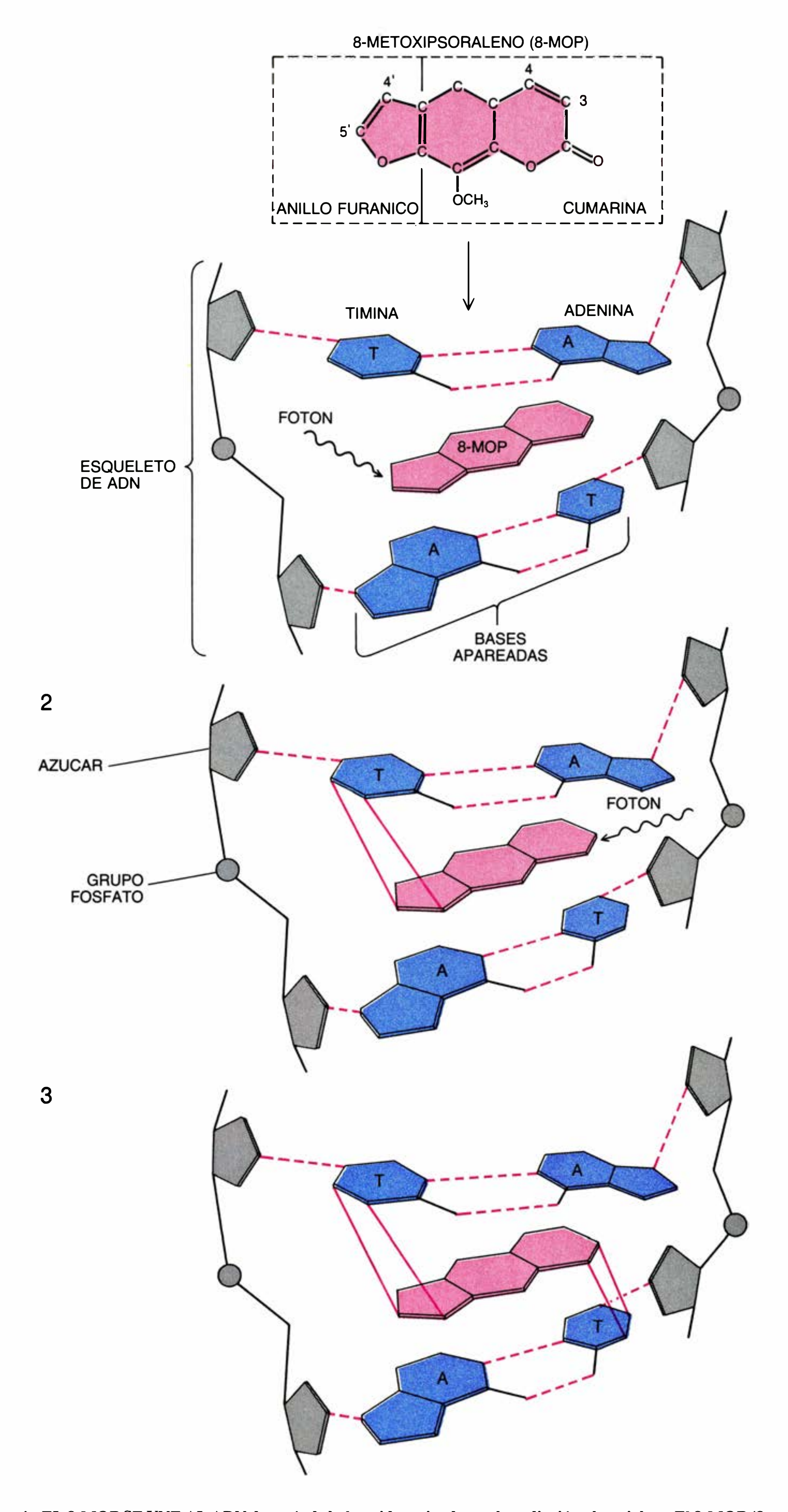
Tras esa demostración inicial, el 8-MOP siguió constituyendo el centro de atención de algunos experimentos. Durante la década de 1970 varios investigadores comprobaron que, en combinación con la luz, el fármaco podría utilizarse para el tratamiento de la psoriasis. (La psoriasis es un trastorno no canceroso en el que las células de la epidermis se dividen con una celeridad por encima de lo normal y forman una piel gruesa y escamosa.) Casi al mismo tiempo, Barbara Gilchrest y sus colegas, de la facultad de medicina de Harvard, encontraron que las lesiones del CTCL localizadas en la piel desaparecían tras un régimen parecido.

El interés del hallazgo residía en parte en que el CTCL es el tipo más común de enfermedad maligna de los linfoci-

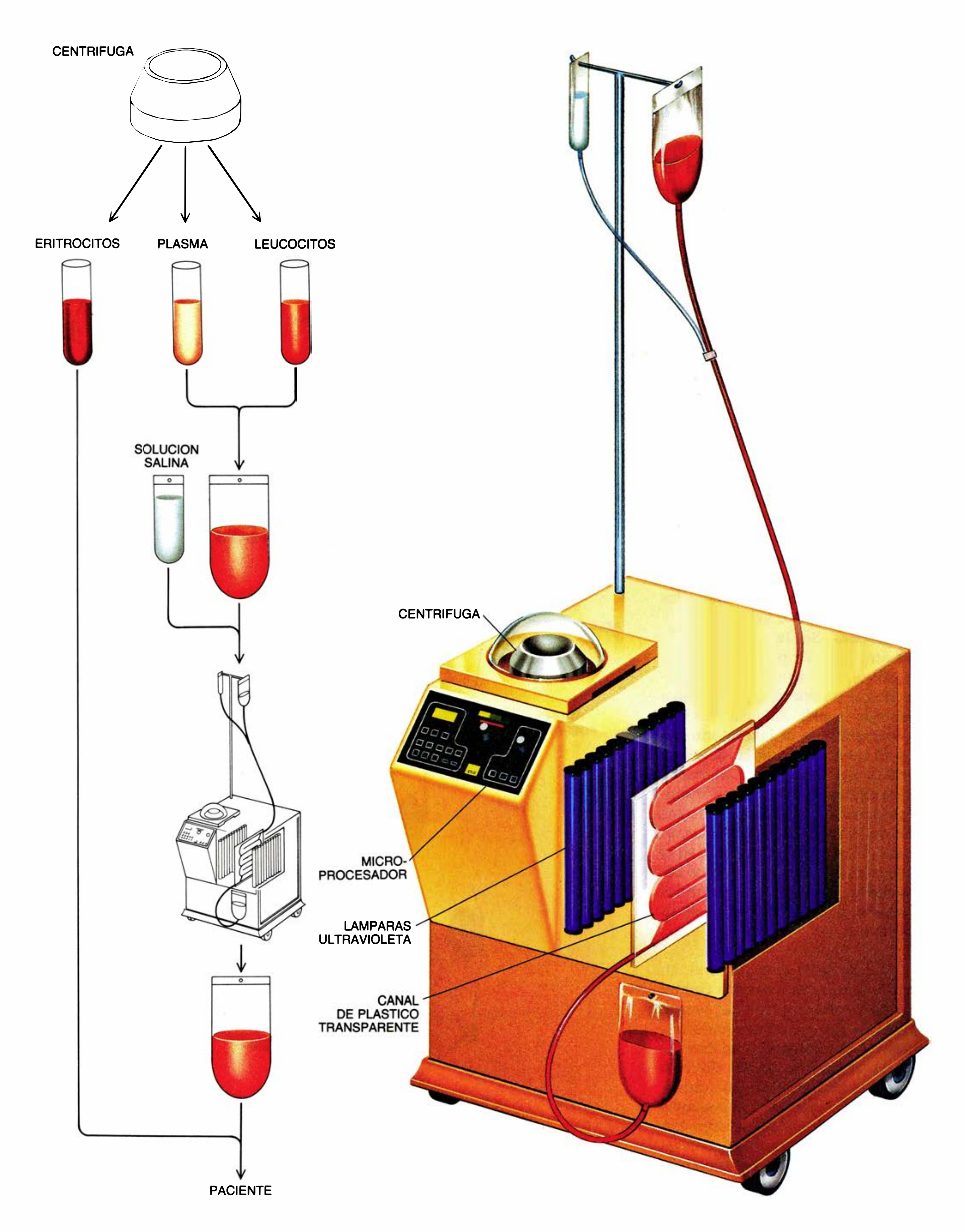
tos *T* en adultos y era obstinadamente resistente a la mayoría de los tratamientos conocidos en los años setenta. En su fase inicial se caracteriza por la aparición de lesiones cutáneas que contienen muchas células *T* malignas. Por extraño que parezca, en realidad es muy habitual la presencia de células *T* en la piel, lo que se explica porque posee importantes funciones inmunológicas [véase "Función inmunológica de la piel" por Richard L. Edelson y Joseph M. Fink; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1985]. En las fases posteriores del linfoma cutáneo de células *T*, las células malignas se diseminan por el cuerpo y el pronóstico es desolador. Efectivamente, el promedio de supervivencia para un paciente no tratado es de unos cinco años a partir del momento en que se confirma el diagnóstico mediante una biopsia.

Parecía probable que funcionase la combinación experimental de Gilchrest, que contemplaba la administración de 8-MOP y la exposición del cuerpo entero a UVA de elevada intensidad, porque la coincidencia del fármaco y la luz dañaban directamente las células *T* enfermas que había en las lesiones cutáneas. Según se sabía desde tiempo atrás, un 25 por ciento de la sangre del organismo atraviesa los vasos de la piel y parte de los UVA salva el grueso de la piel. Además, los trabajos realizados en el laboratorio del autor y en los de Kenneth H. Kraemer y Warwick L. Morison, en Harvard, habían puesto de manifiesto la alta sensibilidad de los linfocitos *T* a los efectos dañinos del 8-MOP y de la radiación ultravioleta. Esos hallazgos apuntaban la tentadora posibilidad de retirar las células malignas del cuerpo y someterlas directamente a la acción tóxica de la droga y la luz.

Tal procedimiento se me ocurrió, en parte, porque ya trabajaba con un sistema para extraer sangre del cuerpo y eliminar de ella las células malignas. El sistema, denominado leucoferesis, implica la separación de los diversos componentes de la sangre por centrifugación. Dado que los componentes poseen distinta densidad, se segregan en el tubo de la centrífuga y pueden separarse. La separación, sin embargo, no es exacta y junto con los linfocitos enfermos se eliminan algunos glóbulos rojos, plaquetas y glóbulos blancos normales. Cuando el procedimiento se llevó hasta sus límites en nuestro esfuerzo por recoger y retirar la mayoría de las células malignas, los pacientes se



4. EL 8-MOP SE UNE AL ADN después de haber sido activado por la radiación ultravioleta. El 8-MOP (8-metoxipsoraleno), que se muestra arriba, es un compuesto sencillo que consta de dos estructuras: un anillo furánico y una cumarina. Cuando llega al núcleo de la célula, se desliza entre las bases apareadas de la cadena del ADN (*1*). Después de absorber un fotón de UVA, la molécula forma un par de enlaces con una base de un nucleótido de una de las cadenas del ADN (*2*). Tras absorber otro fotón, el 8-MOP puede unirse a una base de la otra cadena del ADN (*3*). Al trabarse las cadenas de la hélice, el ADN no puede replicarse.



5. FOTOFERESIS. Parte de la extracción de una muestra de sangre (una cantidad semejante a la que se recoge en una donación de sangre). La máquina de fotoferesis, que se muestra a la derecha, fue desarrollada por ingenieros de Therakos, Inc (filial de Johnson & Johnson) en colaboración con el autor. Se centrifuga la sangre para separar sus componentes y a continuación se mezclan el plasma (la porción líquida de la sangre) y los leucocitos (glóbulos blancos) con solución salina. Ya en la máquina, una delgada película de suspensión de glóbulos blancos avanza por un canal de plástico transparente situado entre dos baterías gemelas de lámparas UVA de gran intensidad. Después de la irradiación, se restituyen los glóbulos rojos a la sangre y se devuelve ésta al paciente.

volvieron anémicos (por carencia de glóbulos rojos) y vulnerables a las infecciones (por carencia de glóbulos blancos).

Se juzgó que podría aumentarse el rendimiento del proceso si, fuera ya del cuerpo, se expusieran los glóbulos blancos a la acción conjunta del 8-MOP y la luz. Al no poseer núcleo ni los glóbulos rojos ni las plaquetas, el fármaco, que se une al ADN, sólo afectaría a los glóbulos blancos. Además, cuando retornara al organismo, el fármaco sería inerte y, por tanto, la sangre constituiría el único tejido expuesto al 8-MOP activado. El autor y sus colegas decidieron ensayar ese método nuevo y prometedor. Temíamos por las consecuencias de devolver al torrente circulatorio del paciente un número tan elevado de células *T* dañadas. Lo que no podíamos predecir era que radicaba ahí la clave de la terapia.

Realizados los ensayos preliminares para determinar las dosis óptimas de medicamento y de luz, seguimos adelante. Los UVA penetran bastante bien a través de un tubo de plástico acrílico; se eligió, pues, ese material para el diseño del sistema de exposición, un proyecto en el que el autor y sus colegas colaboraron con ingenieros de Therakos, Inc., filial de Johnson & Johnson. Los UVA constituyen una forma débil de radiación ultravioleta; la debilidad interesa para reducir al mínimo los efectos colaterales de la exposición, pero en esas circunstancias el canal por el que circula la sangre durante la exposición debe ser extremadamente fino. De lo contrario, los glóbulos rojos absorberán la mayor parte de la radiación antes de que llegue a los leucocitos, situados en el centro del canal. Efectivamente, en la tercera generación de máquinas diseñadas para realizar ese proceso, que ha dado en llamarse fotoferesis, una fina capa de sangre de sólo un milímetro de espesor avanza entre dos fuentes de UVA de gran intensidad.

En el tratamiento pasan ante la fuente de luz unos 500 mililitros de sangre, separada en sus componentes (un volumen semejante al de una donación sanguínea). Por los trabajos anteriores sobre dosificación conocíamos ya las cantidades de luz y de droga a las que, por término medio, debía exponerse la célula *T* para inactivarse. ¿Cuánto tiempo debía estar la sangre expuesta en el aparato y alcanzar esos niveles? Con Francis P. Gasparro y Regina M. Santella, colegas míos, preparé anticuerpos monoclonales contra el complejo de 8-MOP y ADN. Las preparaciones de anticuerpos monoclonales se unen a un único tipo de molécula; empleando esa clase de preparaciones, determinamos la exposición requerida para establecer en cada célula *T* el número de enlaces 8-MOP-ADN necesario. Según los resultados, bastarían 150 minutos de exposición a los UVA en el aparato de fotoferesis.

En principio, la fotoferesis constituía una forma de terapia experimental y potencialmente peligrosa, de ahí que el grupo inicial de pacientes debiera satisfacer una serie de estrictos requisitos. La enfermedad elegida para aplicar el tratamiento fue la variante leucémica del CTCL. La raíz de ese mal es una proliferación masiva de un solo clon de células *T*. El sistema inmunitario posee millones de clones diferentes, es decir, poblaciones genéticamente idénticas de células *T*. Todas las células de un mismo clon portan un receptor capaz de reconocer sólo a una molécula foránea. Cuando en el curso de una enfermedad se presenta esa molécula, la respuesta inmunitaria desencadena la proliferación del clon correspondiente de células *T*. Sin embargo, en el caso de una enfermedad maligna, el clon enfermo se expande masivamente, domina la población de glóbulos blancos y acaba matando a los pacientes.

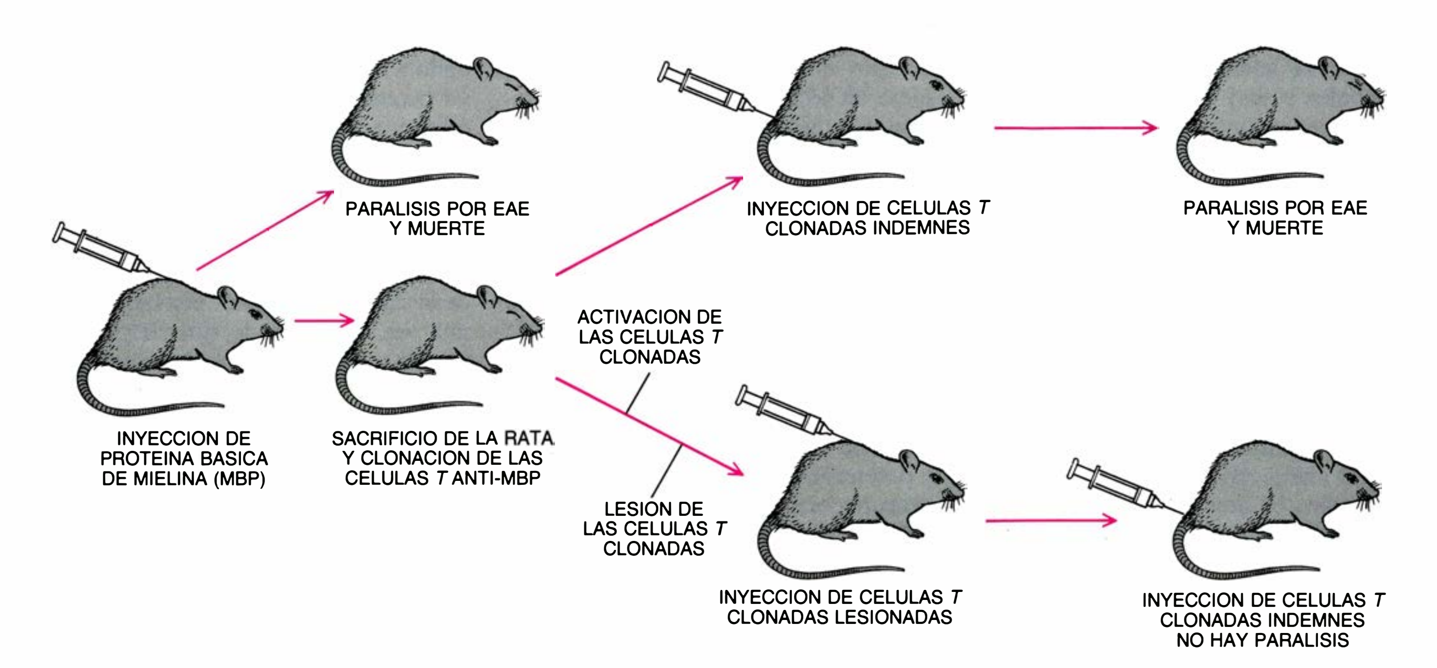
En el tipo leucémico de CTCL, los miembros del clon aberrante emigran (a través de la sangre y de los vasos linfáticos) por la piel y demás tejidos corporales; en la piel se infiltra de tal modo que la superficie entera del cuerpo se enrojece e hincha. Se llega a un estado de extrema debilidad y de desenlace fatal. Sometidos a las terapias convencionales, los pacientes de la fase leucémica de la enfermedad sobreviven tres años, por término medio, y acaban sucumbiendo a infecciones oportunistas o a la destrucción de órganos vitales por las células malignas. Estudios realizados por el grupo del autor y por otros han demostrado que una leucoferesis agresiva (dos o tres veces por semana, durante períodos prolongados de tiempo) proporcionaría una mejoría temporal. Sin embargo, el tratamiento resultaba muy costoso y, las mejorías, muy breves. En 1982, cuando el grupo inició los ensayos de fotoferesis, ningún hospital importante lo aplicaba con regularidad al tratamiento del CTCL.

Se iniciaron los tratamientos siguiendo un régimen conservador, encaminado a establecer la toxicidad del nuevo procedimiento. Cada mes, los pacientes se sometían a fotoferesis dos días sucesivos. Era tal la cantidad de células malignas instaladas en la piel, los nódulos linfáticos y el bazo, que esa baja frecuencia de aplicaciones no permitiría tratar más de un 10 por ciento de la sangre. Se previó, por tanto, que, una vez comprobado que el procedimiento resultaba inocuo, habría que incrementar considerablemente la frecuencia de aplicación. Imagínese el lector la sorpresa de nuestro grupo al observar que cuatro de los cinco primeros pacientes tratados respondían al cabo de sólo seis a diez tratamientos y que, en dos casos, la piel, gravemente afectada, se limpiaba por completo.

Ese misterio clínico pedía una explicación. Una cosa parecía clara desde el principio: la superioridad del procedimiento de fotoferesis sobre la leucoferesis radicaba en que, después de dañados, los glóbulos blancos no se desechaban, sino que se devolvían al sistema del paciente. Este aspecto de la fotoferesis, motivo principal de nuestro temor, parecía constituir la razón de su eficacia. ¿Por qué?

La respuesta tardó algo en llegar. Mientras tanto, organizamos un ensayo de mayores proporciones con el asesoramiento de la Food and Drug Administration (FDA), organismo encargado del control de alimentos y fármacos. Treinta y siete pacientes que no respondían a la terapia convencioal participaron en la prueba en los hospitales clínicos de las Universidades de Yale, Columbia, Pennsylvania, San Francisco, Viena y Düsseldorf. De ellos respondieron 27, incluidos 20 de los 26 en los que ya estaban afectados los nódulos linfáticos (señal de que la enfermedad se encontraba en estado avanzado). A tan destacado nivel de respuesta para una enfermedad resistente a los tratamientos convencionales había que sumar la irrelevancia de los efectos colaterales. La fotoferesis ha sido ya aprobada por la FDA como terapia convencional para la forma avanzada de CTCL.

En nuestra condición de clínicos, el logro resultaba sumamente gratificador. Pero, como investigadores, seguía intrigándonos semejante eficacia del tratamiento. El hallazgo más significativo del ensayo realizado en distintos centros fue, tal vez, que los pacientes que mejor habían respondido eran los que poseían el sistema inmunitario más fuerte al iniciarse el tratamiento. Un



6. "VACUNA" CONTRA LA AUTOINMUNIDAD descubierta por Irun R. Cohen, del Instituto Weizmann de Israel, cuyo mecanismo coincide con el que subyace al procedimiento de la fotoferesis. Se inyecta la proteína básica de la mielina en ratas de laboratorio, que subsiguientemente desarrollan encefalitis autoinmunitaria experimental, un transtorno autoinmunitario causado por la reacción contra la mielina de su propio sistema nervioso. La reacción está mediada por células *T* dotadas de receptores para la proteína básica. Algunas ratas mueren a causa de la afección, pero otras se recuperan. Se recogen las células *T* responsables de la respuesta autoinmunitaria, se clonan, se activan y se dañan mediante presión o con sustancias químicas. Cuando se inyectan esas células en otras ratas, las receptoras quedan protegidas y no adquieren la enfermedad. Si las células *T* se inyectan sin haber sido activadas y dañadas, provocan la alteración. El método es prometedor, pero su aplicación a la terapia humana presenta inconvenientes. Generalmente, en las enfermedades humanas resulta muy difícil, si no imposible, aislar el clon pertinente de células *T*. Es más, la lesión y activación pueden causar efectos colaterales al restituir las células al paciente.

análisis realizado por Carole Berger, colega del autor, evidenció que todos los pacientes que respondían manifestaban una reducción persistente del número de células *T* malignas. Por el contrario, las células *T* normales que resultaban dañadas por la fotoferesis se remplazaban rápidamente por las reservas del cuerpo. La terapia de combinación de radiación luminosa y medicamento instaba la destrucción selectiva del clon maligno.

Sin embargo, se trataba de un resultado paradójico, pues el tratamiento era claramente inespecífico: todas los glóbuos blancos se exponían por término medio a la misma cantidad de 8-MOP y a la misma cantidad de energía radiante. La resolución plausible de la paradoja era que el número de miembros del clon maligno superaba el de cualquier otro clon de células *T*, hasta el extremo de que, reintroducidas en el cuerpo, las células enfermas provocaban una intensa respuesta específica, no dándose ese caso para las otras. Los clones malignos suelen multiplicarse lo suficiente para que sus miembros sobrepasen en número cualquier otro clon en una proporción de un millón a uno, aproximadamente. Así, al retornar al cuerpo, el bazo organizaría una potente respuesta inmunitaria frente a ellas, pero no contra las células normales, demasiado escasas para desencadenar esa potente respuesta.

¿Por qué reaccionaría el sistema inmunitario ante un grupo de sus propias células *T*, malignas o no? La respuesta nos sumerge en las profundas aguas de la moderna inmunología; en particular nos conduce al trabajo de Irun R. Cohen [véase "Lo propio, lo ajeno y la autoinmunidad", por Irun R. Cohen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1988]. El receptor que permite a la célula *T* reconocer un antígeno específico (una molécula foránea) es también una proteína susceptible de ser reconocida por el sistema inmunitario, del mismo modo que lo es la proteína de un patógeno. La parte distintiva de su receptor, que le permite acoplarse con su antígeno, se denomina idiotipo; el acoplamiento entre el mismo receptor y un segundo receptor situado sobre otro linfocito, que a su vez es capaz de acoplarse a él, se conoce como interacción anti-idiotipo. La fotoferesis no daña el conjunto del sistema inmunitario, de ahí que la explicación más atractiva de los resultados del grupo del autor fuera que el sistema inmunitario (en particular el bazo) desencadena una poderosa respuesta por conducto de células portadoras de receptores anti-idiotípicos que reconocen el clon maligno.

Las observaciones sugerían que los resultados podrían interpretarse mejor a la luz de los estudios con animales realizados por Cohen y su grupo, quienes habían venido trabajado con varias enfermedades experimentales en las que se evocaba una respuesta autoinmunitaria después de inocular una sustancia específica a un animal de laboratorio. La causa de la enfermedad reside en el antígeno inyectado, que remeda las moléculas de los tejidos del organismo y así las células *T* anti-antígeno atacan también el tejido normal. Por ejemplo, las ratas a las que se inoculaba proteína básica (un componente de la mielina de la vaina de ciertos nervios) desencadenaban encefalitis autoinmunitaria experimental, EAE, una enfermedad paralizante del sistema nervioso.

El hallazgo más espectacular de Cohen fue que, cuando se lograba identificar el clon de células *T* responsable de la respuesta inmunitaria, ese clon podía emplearse como "vacuna". Volviendo a las ratas que habían padecido EAE, de las que se habían recuperado se obtuvo el clon anti-proteína básica. Se sometieron las células a los efectos de ciertas sustancias activantes y, por diversos procedimientos, se agregaron los receptores presentes en su superficie, para que robustecieran su inmunogenicidad. Cuando las células así tratadas se inyectaban en otras ra-

tas, los receptores quedaban protegidos contra el desarrollo de EAE; las células tratadas actuaban de "vacuna" contra la autoinmunidad.

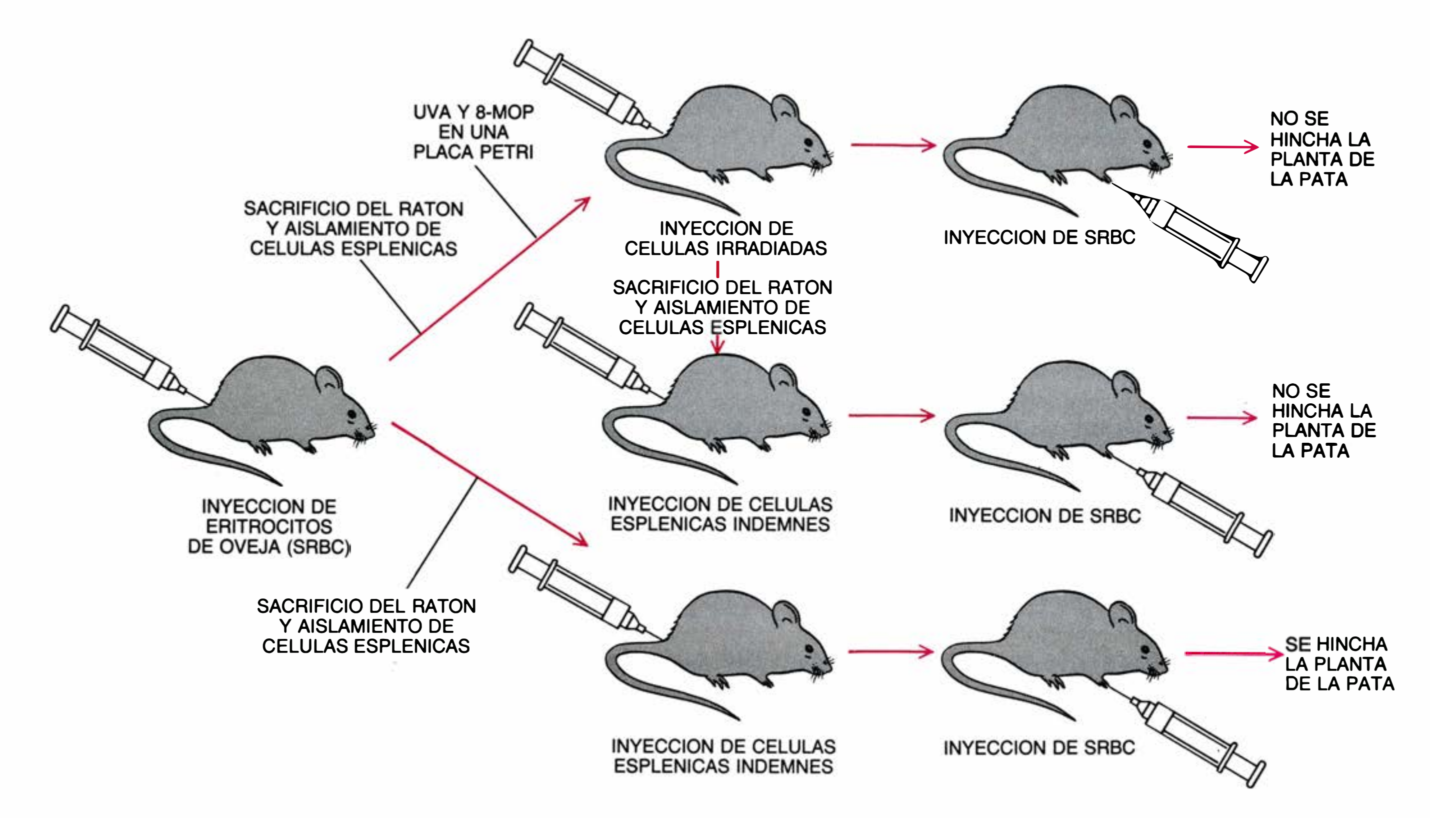
Tales resultados parecían guardar un notable paralelismo con los del equipo del autor. En efecto, habían tomado células *T* del cuerpo, las habían lesionado y las habían reintroducido. Muchas de las células con las que trabajaban procedían, además, de un mismo clon, el maligno. Quizá la fotoferesis "vacunaba" los pacientes de CTCL contra su propio cáncer.

Para comprobar si ése era el caso, Berger, Maritza Perez y Liliane Laroche mimetizaron y ensayaron en mi laboratorio diversos sistemas experimentales de fotoferesis. En esas pruebas se utilizó una cepa endógama de ratones genéticamente idénticos, que se inocularon con glóbulos rojos de oveja, lo que les provocó una intensa respuesta inmunitaria. Se recogieron en placas células de bazo de esos ratones y se expusieron a 8-MOP y radiación ultravioleta. Seguidamente se devolvieron las células esplénicas a ratones de la misma cepa. Al exponer a los glóbulos rojos de oveja los ratones así "vacunados", no mostraron respuesta inmunitaria. La razón más verosímil era que la "vacunación" había desencadenado en los ratones una fuerte respuesta inmunitaria anti-idiotípica contra las células del bazo que, en otras circunstancias, les hubieran defendido, a buen seguro, contra las células foráneas.

Este resultado (y varios otros análogos) dejó claro que la fotoferesis podía provocar al efecto observado por Cohen y sus colegas. De hecho, desde la perspectiva que brinda el tiempo, se descubre ahora que el 8-MOP y los UVA constituyen medios ideales para lograr estos mismos efectos. Activar un potente fármaco para que dañe gran número de células *T*, anormales y portadoras de un marcador de superficie específico, y devolverlas luego a un sistema inmunitario intacto, resulta un método idóneo para estimular una respuesta inmunitaria específica contra aquellas células. Se comprende ya la eficacia de la fotoferesis: las células dañadas del clon maligno priman el sistema inmunitario para que destruya aquel clon específicamente, librando al cuerpo de su cáncer.

Queda pendiente una importante cuestión teórica. ¿Por qué si en la sangre del paciente hay tantísimas células del clon maligno el sistema inmunitario no dicta la misma respuesta por sí mismo? En la leucemia, el clon maligno suele representar más del 20 por ciento del total de leucocitos. El trabajo de Cohen sugiere que, en los sistemas animales, las células *T* deben primero activarse y luego dañarse antes de desencadenar la respuesta adecuada. Las células *T* malignas ya están activadas (como parte del proceso canceroso); pero resulta necesaria la fotoferesis porque el daño infligido a la célula aumenta su inmunogenicidad. Se trabaja en el laboratorio del autor y en otros para aclarar por qué.

En última instancia podría aplicarse la fotoferesis para tratar una amplia gama de enfermedades que comportan una proliferación de clones específicos de células *T*. Para cuando llegue el momento de esa aplicación, la fotoferesis podría haberse perfeccionado con nuevos refinamientos. Pensemos en la mejora del propio fármaco. El aminometil-trimetilpsoraleno, un análogo sintético del 8-MOP, es más soluble en agua que la sustancia natural y muestra mayor afinidad por el ADN. Esas propiedades propician, según han demostrado Gasparro y sus colaboradores, un incremento significativo de la actividad de la molécula. No hay duda de que, en el futuro, se encontrarán o se sintetizarán otros medicamentos apropiados para la fotoferesis.



7. EXPERIMENTO DEL AUTOR. A través de un mecanismo análogo al descubierto por Cohen, la administración de 8-MOP y la aplicación de UVA evitan que se desencadene una respuesta inmunitaria específica. Se inyecta glóbulos rojos de oveja en ratones para que desarrollen una respuesta inmunitaria contra las células de la oveja. La reacción corre a cargo de células *T* concentradas en el bazo. Se extraen células esplénicas y, en una placa de laboratorio, se someten a la acción de los rayos UVA y el 8-MOP. Cuando se inyectan a otros ratones, impiden específicamente la respuesta inmunitaria a los glóbulos rojos de oveja, sin clonación ni activación adicional. Así pues, la combinación de luz y 8-MOP puede constituir la base de un método que ya goza de aplicación clínica.

Es de presumir el descubrimiento de nuevas y mejores vías para administrar la droga y la luz en los tejidos de interés. Shrishailam Yemul, Alison Estabrook, Hagen Bayley, Berger y el autor han estudiado un sistema experimental de administración de la droga en el que se unen anticuerpos monoclonales a pequeñas vesículas (pequeñas bolsas), formadas por una bicapa lipídica del mismo tipo que la membrana externa de la célula. Eligiendo el anticuerpo apropiado, hemos logrado que las vesículas se unan preferentemente a determinados tipos de células. En las vesículas se incorporan moléculas de pireno, un fármaco fotoactivo; cuando la vesícula llega al sitio efector y la luz activa el pireno, la droga abre agujeros en la membrana celular externa y mata la célula.

Se están preparando otros sistemas experimentales, todos los cuales ofrecen la ventaja teórica de una elevada especificidad. En esos sistemas, el fármaco no sólo podría activarse fuera del cuerpo, como ocurre en los sistemas actuales de fotoferesis, sino también en su interior, de encontrarse un medio para transportar la luz hasta el punto preciso donde se necesita. Las moléculas híbridas utilizadas en estos sistemas pueden considerarse prototipos de los medicamentos de una nueva categoría de agentes farmacológicos: los fotoactivados.

Los conocimientos técnicos actuales permiten modificar casi cualquier droga para que sólo pueda activarse por medio de la luz. Quizás algún día, volviendo la vista atrás, los psoralenos sin modificar nos parezcan meros precursores de una clase totalmente nueva de agentes terapéuticos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CUTANEOUS T CELL LYMPHOMA. Robert M. Knobler y Richard L. Edelson en *The Medical Clinics of North America*, vol. 70. n.º 1, págs. 109-138; enero de 1986.

SELECTIVE KILLING OF T LYMPHOCYTES BY PHOTOTOXIC LIPOSOMES. Shrishailam Yemul, Carole Berger, Alison Estabrook, Sylvia Suarez, Richard Edelson y Hagen Bayley en *Proceedings of the National Academy of Siences of the United States of America*, vol. 84, n.º 1, págs. 246-250; enero de 1987.

TREATMENT OF CUTANEOUS T-CELL LYMPHOMA BY EXTRACORPOREAL PHOTOCHEMOTHERAPY: PRELIMINARY RESULTS. Richard Edelson et al. en *The New England Journal of Medicine*, vol. 316, n.º 6, págs. 297- 5 de febrero de 1987.

Percepción de la forma a partir del sombreado

El sombreado hace forzosa la percepción de la forma tridimensional. Uno de los modos como el cerebro simplifica la tarea de interpretar las sombras es dando por supuesto que hay una sola fuente de luz

Vilayanur S. Ramachandran

Nuestra experiencia visual del mundo se basa en imágenes bidimensionales: muestras sin relieve de intensidades luminosas y colores diferentes inciden sobre un solo plano de células de la retina. Lo que no obsta para que percibamos grosores y profundidades. Que podamos hacerlo se debe a que, en la imagen retiniana, hay a nuestra disposición unos cuantos indicadores del realce o la hondura: el sombreado, la perspectiva, la oclusión de un objeto por otro y la disparidad estereoscópica. Sin que sepamos cómo, el cerebro recurre a esos indicadores para obtener las formas tridimensionales de los objetos.

Entre los muchos mecanismos de que se sirve nuestro sistema visual para hacerse con la tercera dimensión, el más primitivo es, probablemente, el que le permite explotar el sombreado. Una razón para creerlo así es que, en la naturaleza, la evolución les ha ido empalideciendo a muchos animales sus partes bajas, presumiblemente para hacerlos menos visibles a los predadores. El "contrasombreado" compensa los efectos de la sombra producidos por el sol al brillar desde arriba y trae, al menos, dos beneficios: reduce el contraste con el trasfondo y "aplana" la forma que del animal se percibe. El que en diversas especies, incluidos muchos peces, predomine el contrasombreado sugiere que el sombreado puede ser una fuente decisiva de información relativa a la forma tridimensional.

VILAYANUR S. RAMACHANDRAN enseña psicología en la Universidad de California en San Diego y biología en el Instituto de Tecnología de California. Se doctoró en medicina en la Universidad de Madrás y en neurofisiología en la de Cambridge. Ha disfrutado de bolsas de estudio y colaboración en numerosas instituciones académicas, incluida la Universidad de Oxford, donde investigó el desarrollo de los mecanismos nerviosos binoculares en los gatos y en los corderos. Sus preocupaciones actuales las orienta a dar con los mecanismos fisiológicos subyacentes a los efectos perceptivos descritos en este artículo.

Ni que decir tiene que los pintores han utilizado desde hace mucho las luces y las sombras para transmitir vívidas ilusiones de profundidad. Los psicólogos, empero, no se han aplicado gran cosa a investigar de qué mecanismo se valen el ojo y el cerebro para sacar provecho de lo que las sombras les informan. Por tal motivo mis colegas y yo emprendimos una serie de experimentos con miras a descubrir cuáles podrían ser esos mecanismos.

Empezamos por crear una serie de muestras computerizadas de objetos sencillos en los que la impresión de profundidad se producía tan sólo por leves variaciones del sombreado. Nos aseguramos bien de que no hubiese en las imágenes ni objetos ni figuras complicados, porque lo que pretendíamos era aislar los mecanismos cerebrales que procesan la umbroinformación separándolos de otros mecanismos de más alto nivel que puedan contribuir también a la percepción de la profundidad en los procesos visuales de la vida real.

Nuestros experimentos se basaban en formas circulares sombreadas, que no pueden dejar de producir una fuerte sensación de relieve [*véase la figura 2*]. Las formas o sobresalen como huevos o se hunden como hueveras. Esas formas son ambiguas porque el cerebro no sabe en qué dirección está brillando la luz. Con poco esfuerzo se puede desplazar mentalmente la fuente de luz para invertir el relieve de los objetos.

Lo curioso es que, al invertir mentalmente el relieve de un objeto, se invierten al propio tiempo todos los demás objetos de la muestra. Esto plantea una cuestión interesante: la propensión a ver todos los objetos de la muestra simultáneamente convexos (o cóncavos), ¿se basa en una tendencia a verlos como ofreciendo todos ellos el mismo relieve, o se basa en la tácita suposición de que están iluminados por una sola fuente de luz? Para averiguarlo ideamos una muestra en la que una fila de objetos constituía la imagen especular de otra [*véase* b]. En tal caso, cuando los sujetos ven los objetos de una fila convexos, perciben siempre cóncavos los de la otra.

De este sencillo experimento sacamos dos conclusiones. Primera, que el derivar la forma a partir del sombreado no puede ser una operación estrictamente local, sino que ha de constituir un proceso global que implique el campo visual entero o una gran porción del mismo. Segunda, que el sistema visual parece dar por supuesto que sólo una fuente de luz ilumina la imagen entera. Esto quizá se deba a que nuestros cerebros han evolucionado en un sistema solar que tiene solamente un sol.

Otra manifestación de esta regla la apreciamos en una forma compleja que sugiere un tubo blanco iluminado desde un lado [*véase* c]. Tal forma parece casi siempre convexa, seguramente a causa de sutiles indicadores como son la oclusión de una parte del tubo por otra, o quizá por una tendencia general a ver convexas tales formas. Cosa interesante: el relieve de los dos discos superpuestos sobre el tubo ha perdido su carácter ambiguo, y uno se ve como una hinchazón y el otro como una cavidad. Al parecer, ciertos rasgos del objeto pueden informar al cerebro so-

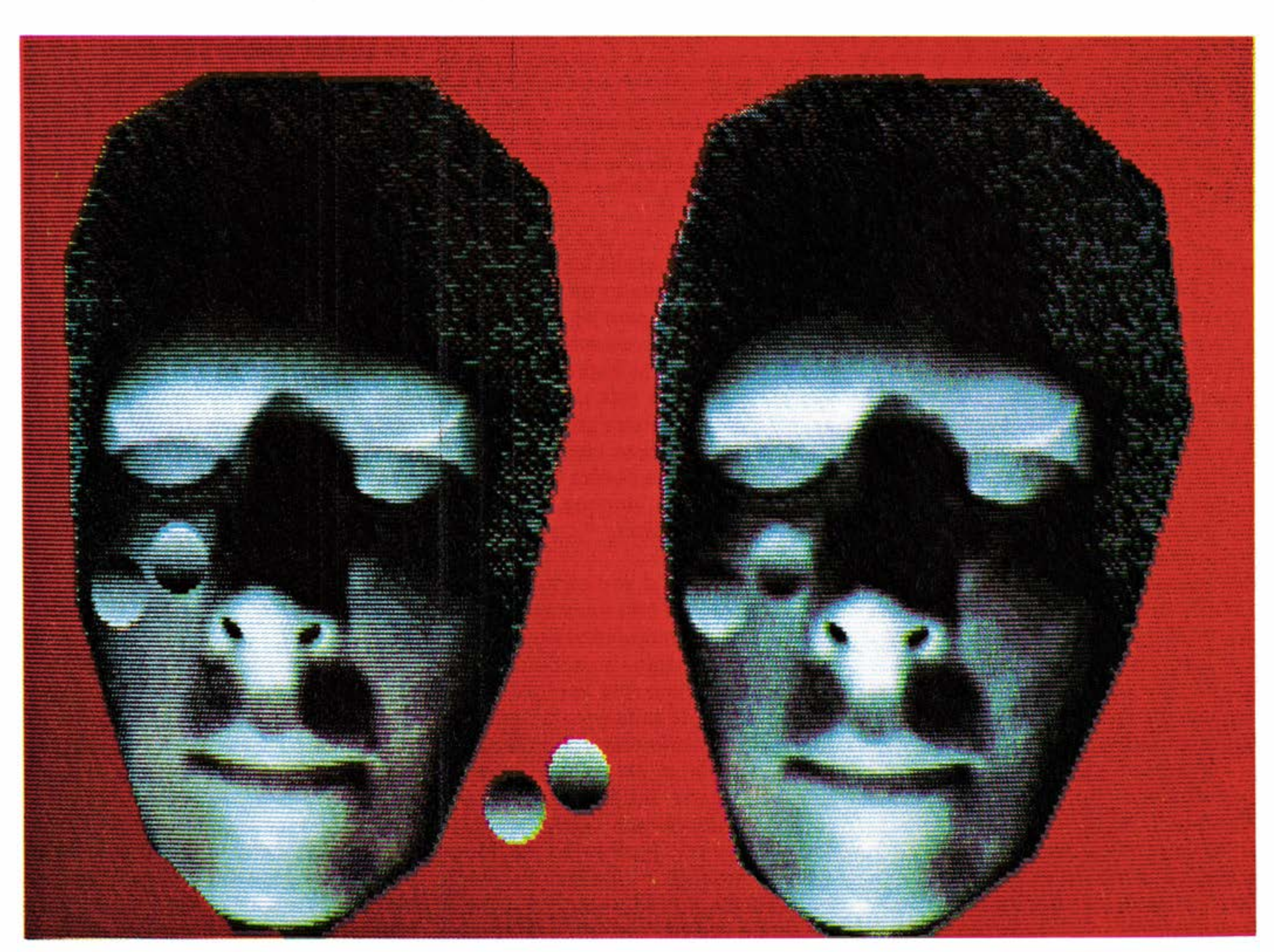
bre la dirección de la iluminación y luego se hace que el relieve de las otras partes del objeto sea conforme a la fuente luminosa.

El sistema visual, además de suponer que hay una única fuente de luz, tiende también a aceptar, con bastante naturalidad, que la luz viene de arriba. Lo comprobamos de modo muy palmario mediante una muestra en la que un grupo de círculos sombreados era mera versión idéntica de otro grupo, sólo que invertida [*véase la figura 3*]. Los observadores perciben siempre el grupo *a* cual si constara de esferas y el grupo *b* como si lo integraran cavidades. Si se invierte la página se comprueba una llamativa inversión del relieve: los objetos del grupo *b* parecen ahora convexos y, cóncavos, los del grupo *a*. (El lector puede entretenerse recortando la ilustración y montándola sobre una placa giratoria. ¿A qué velocidad podrá hacerse girar ésta antes de que dejemos de ver las inversiones?)

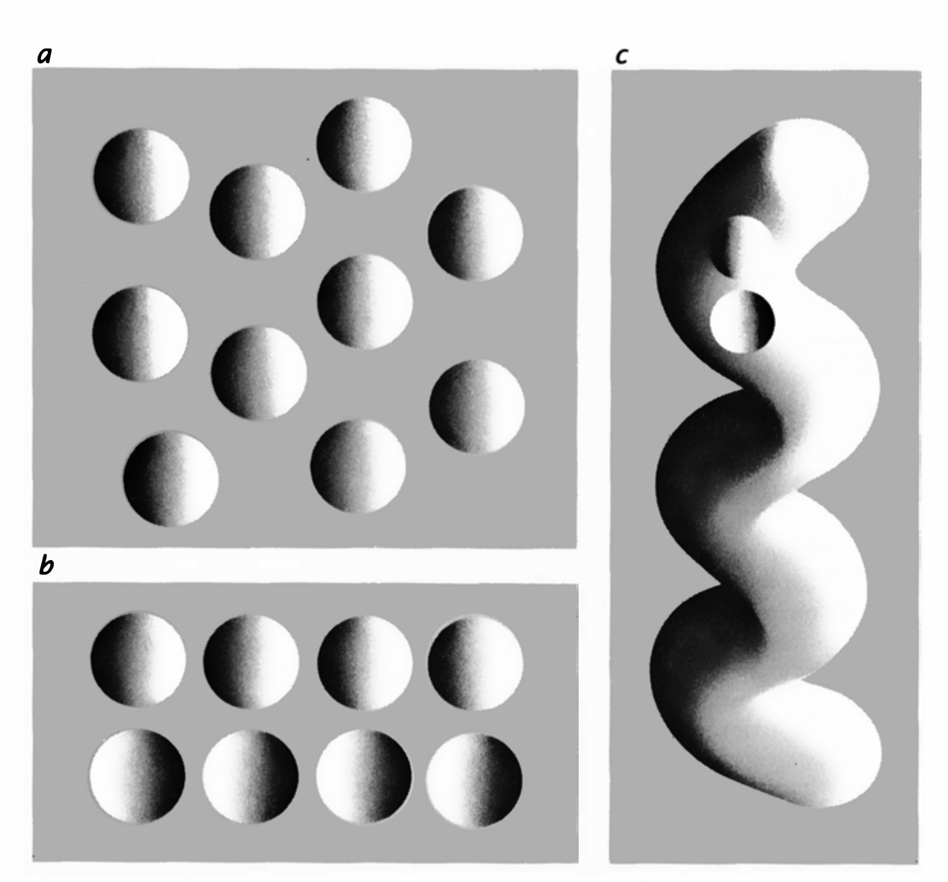
Estas observaciones sugieren que el cerebro da por supuesto que el sol emite su luz desde arriba. Mas, ¿cómo se las arregla el cerebro para distinguir el "arriba" del "abajo"? ¿Es la orientación del objeto respecto a la retina lo que importa, o es su orientación con respecto al mundo exterior? Para comprender este punto, haga Vd. el siguiente experimento: échese en un sofá dejando que la cabeza le cuelgue por un borde, de tal modo que pueda verlo todo al revés; en esa posición, pídale a un amigo que se le acerque por detrás de la cabeza y le muestre la figura 3 manteniéndola sin invertir. Los objetos del grupo *a* le parecerán a Vd. cóncavos y los del *b* convexos; o sea, que se obtiene el mismo efecto que cuando se volvía del revés la página. Por tanto, es la orientación del objeto en la retina lo que importa. Vuestro conocimiento objetivo del arriba y el abajo no afecta a vuestra percepción del relieve.

De suyo, el sombreado genera solamente una débil impresión de la forma tridimensional. Para que produzca una convincente impresión de relieve, la superficie sombreada ha de estar, además, cerrada por un contorno. De hecho, en muchas de nuestras muestras la variación luminosa sólo se aproxima algo a la suave y difusa variación del auténtico sombreado, no obstante lo cual la mera presencia de un trazo circular en torno a la zona sombreada puede producir una viva impresión de superficie esférica. Esto plantea una nueva cuestión: ¿Qué papel desempeña el contorno a la hora de determinar la percepción de la forma a partir del sombreado?

Para responder a esa cuestión diseñamos un par de objetos que tuvieran idénticos sombreados y diferentes contornos [*véase la figura 4*]. Ambas imágenes poseían el mismo gradiente de luminosidad: una fotocélula que pasara sobre ellas registraría en las dos idénticas variaciones de la distribución lumínica. Sin embargo, las imá-



1. MASCARILLAS CUYOS REHUNDIDOS, iluminados desde arriba, producen la extraña impresión de unos rostros en los que los rasgos más pronunciados reciben la luz desde abajo. Al interpretar las imágenes sombreadas, el cerebro suele dar por supuesto que la luz proviene de arriba, pero en este caso rechaza el supuesto para interpretar las imágenes como normales objetos convexos. Nótese que los dos discos situados entre las mascarillas siguen pareciendo iluminados desde arriba: el de la derecha se ve como cóncavo y el de la izquierda como convexo. Pegados los discos sobre el pómulo (*izquierda*), su relieve se torna ambiguo. Cuando se los fusiona más con la mejilla (*a la derecha*), los discos se ven como si estuvieran iluminados desde abajo, igual que el resto del rostro.



2. ¿ESFERAS O CAVIDADES? Depende de dónde se piense que se encuentra la fuente de luz. Puede invertirse el relieve de los objetos (*a*) pasando mentalmente la fuente luminosa de la izquierda a la derecha. En una segunda disposición (*b*), cada fila es de suyo ambigua, pero cuando se haya visto una como convexa, la otra parecerá siempre cóncava. Resulta casi imposible ver ambas como simultáneamente convexas o simultáneamente cóncavas. La forma retorcida (*c*) sugiere un tubo blanco iluminado desde la derecha. Los dos discos que hay en él parecen adaptarse al sistema iluminante: el de arriba se ve como saliente y el de abajo como cavidad. Este último experimento lo hizo el autor con Dorothy Kleffner y Steven J. Cobb.

genes aparecían notablemente diferentes. La de encima sugería tres cilindros puestos uno junto a otro, mientras que la de debajo producía la inconfundible impresión de una lámina de metal ondulado. Las percepciones parecían depender de las líneas de los bordes superior e inferior de ambas superficies.

Basados en tales demostraciones, llegamos a la conclusión de que, cuando los umbroindicadores eran ambiguos, la información procedente de los bordes ayudaba a resolver la ambigüedad a través de la imagen. Curiosamente, la percibida posición de la fuente de luz iba también cambiando para corresponder a la superficie percibida. En la imagen superior de la figura 4 parece que la luz se origina perpendicularmente a la página, mientras que en la imagen inferior la iluminación viene desde lejos por la izquierda o desde lejos por la derecha. Es digno de notar que al cambiar los límites de un objeto puedan producirse cambios tan notables en la percepción.

Nuestra siguiente demostración probó que hasta los contornos ilusorios producían esos efectos. Un ejemplo típico lo constituía el de cuatro discos de color gris oscuro a cada uno de los cuales se le había quitado un buen "mordisco" [*véase la figura 5*]. Cuando los discos están convenientemente dispuestos, se tiene la impresión de que hay un gran disco más claro que tapa parcialmente los discos gris oscuro. Diríase que unas líneas casi imperceptibles conectaran los bordes cóncavos de los discos oscuros, aunque físicamente tales líneas no existen.

¿Qué ocurre si sustituimos el trasfondo de esta muestra por otro en el que la luminosidad varíe de arriba abajo? Al principio, la nueva muestra parece plana, pero si se la sigue mirando resulta que la zona que constituye el gran disco ilusorio empieza a abultarse saliendo hacia el observador y puede hasta destacarse del fondo para tomar la apariencia de una esfera flotante. Por extraño que parezca, un contorno ilusorio funciona mejor que otro real. La causa no está del todo clara, pero el resultado sugiere que el cerebro considera la oclusión parcial como prueba más sólida de la existencia de un objeto que no la presencia de un simple contorno. Al fin y al cabo, el contorno podría representar lo mismo un rizo de fino alambre que una transparente pompa de jabón.

Esta observación, igual que la precedente, demuestra que se da una poderosa interacción entre los bordes, ya sean reales o ilusorios, y la derivación de la forma a partir del sombreado. Si el sistema visual fuese haciendo mediciones detalladas de sólo el sombreado para obtener la orientación de la superficie (como lo implican algunos modelos de visión de inteligencia artificial), no se vería una esfera en la imagen, porque el sombreado no cambia en absoluto a lo largo del borde ilusorio. Pero el sistema visual percibe una esfera porque el sombreado y el contorno ilusorio refuerzan mutuamente esa interpretación.

Otro modo de delinear objetos el sistema visual es mediante cambios en la reflectancia superficial, o proporción de luz reflejada por las superficies. Al recorrer los bordes de un objeto, la célula fotoeléctrica suele registrar bruscos cambios de la luminancia. ¿Qué sucedería si el contorno estuviese definido por un cambio de color en vez de por un cambio de luminancia? Tomamos una "esfera" sombreada y reemplazamos el fondo gris, homogéneo, por otro fondo coloreado cuyo gradiente de luminancia era igual al de la esfera. El resultado fue patente: se esfumó la ilusión de relieve y la esfera pareció aplanarse, aunque su contorno se distinguía con nitidez por el contraste de coloraciones. Sacamos la conclusión de que el sistema forma-a-partir-del-sombreado no puede utilizar bordes que se definan por las diferencias de color. Una razón tal vez sea que nuestros primitivos ascendientes primates, tarsiformes, poseían hábitos nocturnos y eran ciegos para los colores; en su crepuscular mundo a media luz tan sólo podían contar, para percibir el relieve y las profundidades, con los contrastes entre luminancias.

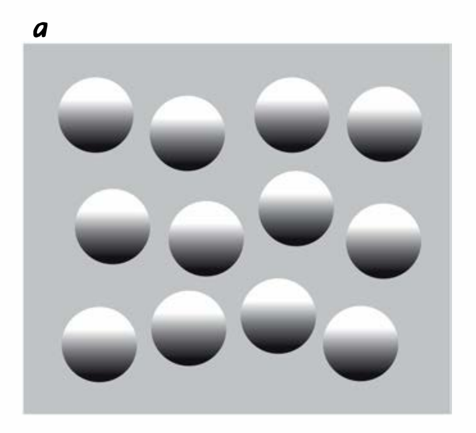
Estas demostraciones implican que el cerebro logra enterarse de la forma de los objetos mediante la combinación de contornos y umbroindicadores. ¿Qué es lo que hace el cerebro con las formas una vez las ha obtenido? Una importante capacidad perceptiva es la habilidad para separar la figura del fondo. Hasta en un escenario desordenado puede el sistema visual decidir qué rasgos de la imagen conviene que se junten para crear objetos. En una fotografía de fuerte contraste se puede ver un perro dálmata que se contradistingue sobre un fondo moteado

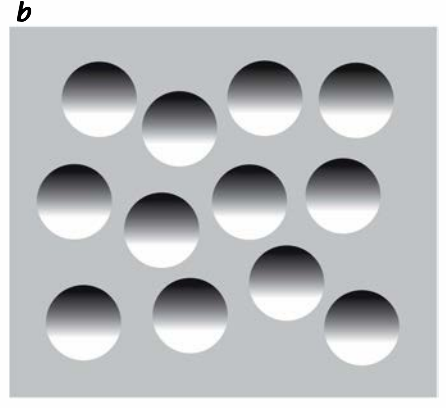
[*véase la figura 6*]. De manera similar, puede "entresacarse" un grupo de rayas que posean determinada orientación separándolas mentalmente de un campo de rayas orientadas en otro sentido. Por otro lado, es imposible separar un grupo de letras especularmente invertidas de su conjunto con otras letras no invertidas.

Los primeros en estudiar sistemáticamente las leyes del agrupamiento perceptivo fueron Anne M. Treisman, de la Universidad de California en Berkeley, Bela Julesz, de los laboratorios AT&T Bell, y Jacob Beck, de la Universidad de Oregón. Descubrieron varios principios de interés. Primero, averiguaron que un importante estadio incoativo de la percepción visual implica la extracción de ciertos rasgos elementales, que Julesz denomina textones. Entre los ejemplos se incluyen los bordes orientados, el color y la dirección del movimiento. En cuanto el sistema visual ha extractado los rasgos elementales, los rasgos similares son reunidos en grupos para formar los objetos. Beck sugiere que sólo los rasgos elementales, por definición, pueden ser agrupados así. Presumiblemente, pues, los caracteres alfabéticos no son rasgos elementales por lo que atañe al sistema visual.

Pero, ¿qué pasa con los objetos tridimensionales? Nuestras demostraciones probaron a este respecto que hasta formas definidas exclusivamente por el sombreado pueden servir como rasgos elementales de la percepción visual. En una serie de cavidades entremezcladas con formas convexas, por ejemplo, estas últimas pueden agruparse mentalmente y crear un plano de relieve aparte, que se distingue con claridad de las formas cóncavas del fondo [*figura 7*].

Al mirar este despliegue parece como si el sistema visual atravesara varias fases de procesamiento. En la primera de ellas, el sistema efectuaría cómputos para definir las formas tridimensionales, tardando varios segundos. Una vez han emergido las formas convexas, se tendría la clara impresión de ser capaz de "retenerlas" indefinidamente para agruparlas con datos similares de la muestra. Por último, agrupados ya los objetos, se los separaría netamente de los detalles irrelevantes del fondo. Así pues, la extracción y el agrupamiento de los textones, aunque se describan como operación de un solo paso, podrían implicar varias capacidades perceptuales distintas, que actuarían de consuno para delinear la figura destacándola del fondo.

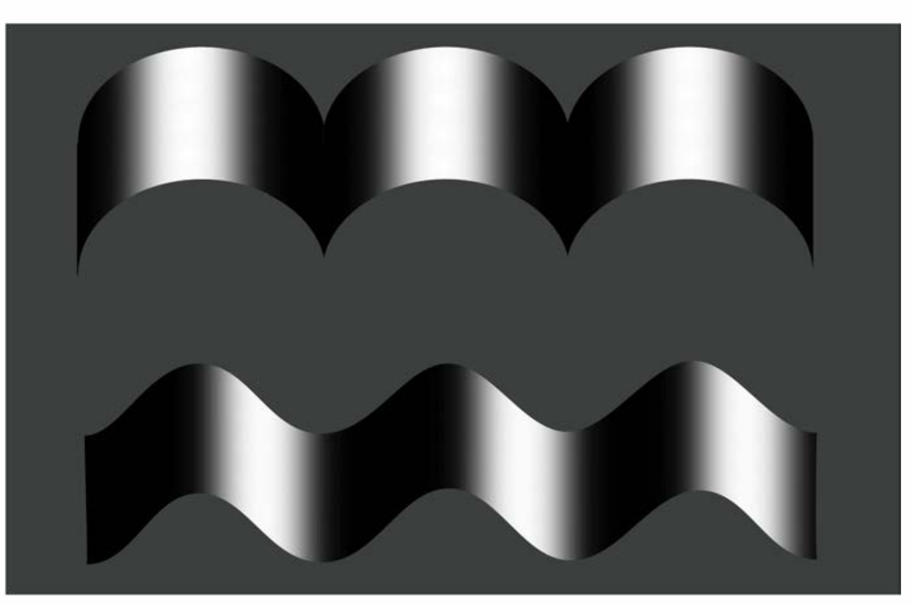




3. EL CEREBRO DA POR SUPUESTO que la luz viene de arriba. Por ello, los objetos del grupo *a* (*fotografía de la izquierda*) parecen convexos, mientras que los del grupo *b* (*a la derecha*) parecen cóncavos. Si invertimos la página, se invertirá también el relieve de los objetos. Si nos ponemos cabeza abajo y miramos la página, comprobaremos que lo que importa para la percepción del relieve es la orientación de la imagen en la retina.

Nos preguntamos si el agrupamiento perceptivo observado en este despliegue podría deberse a algún otro rasgo más elemental que la forma tridimensional. Por ejemplo, como las formas convexas difieren de las cóncavas en la polaridad de su luminancia que va del brillo a la oscuridad, cabría suponer que el agrupamiento se obtuviese por fijarse en la polaridad de la luminancia. Para eliminar esta posibilidad creamos una muestra de objetos que poseían las mismas polaridades de luminancia que los de la muestra anterior, si bien no aportaban ninguna información acerca del relieve. Era casi imposible lograr agrupamiento perceptual en esta muestra. Aun después de haber examinado uno por uno todos los objetivos idénticos, no hay modo de separarlos de los otros. Queda claro que el agrupamiento observado en la muestra precedente debe basarse en la forma tridimensional y no en la polaridad de la luminancia.

Ya he indicado que la ilusión de relieve es mucho más fuerte cuando la iluminación proviene de arriba que cuando parece provenir de un costado. Asimismo, la luz procedente de arriba aumenta grandemente nuestra capacidad de agrupar y separar imágenes. Puede comprobarse esto con sólo girar 90 grados el grupo *a* de la figura 7: la impresión de relieve disminuirá y habrá una considerable reducción de la separación perceptiva. Ello abona más la idea de que el agrupamiento perceptivo debe tener por base la forma tridimensional. Más aún, estos agrupamientos pueden representar, por sí mismos, formas de alto nivel, tales como un triángulo. Sería interesante emplear estímulos de este tipo para averiguar si los



4. LOS LIMITES influyen en la interpretación de las superficies sombreadas. Ambas imágenes tienen la misma variación del sombreado, pero la superior sugiere tres cilindros iluminados en sentido vertical a la página y la inferior una lámina metálica ondulada que recibe la luz procedente de la derecha o la izquierda.

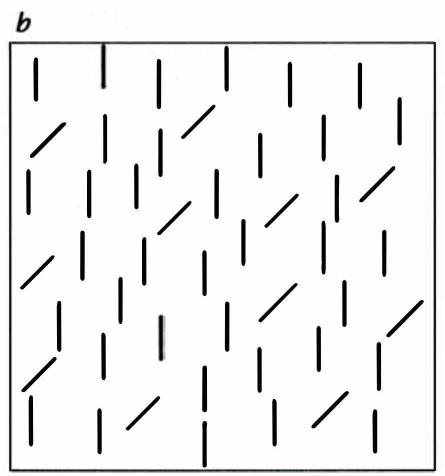
5. UN CIRCULO ILUSORIO se produce alineando convenientemente cuatro discos grises a los que les falta un buen "bocado" o muesca (*a*). El trasfondo sombreado crea la esfera ilusoria (*b*). El contorno circular no resulta mucho más eficiente (*c*). El borde circular definido por un cambio del tono lumínico produce la fuerte ilusión de una esfera (*d*). El fondo coloreado define también el borde; mas, como la gradación luminosa del fondo es equivalente a la del círculo sombreado, disminuye la ilusión de relieve (*e*).

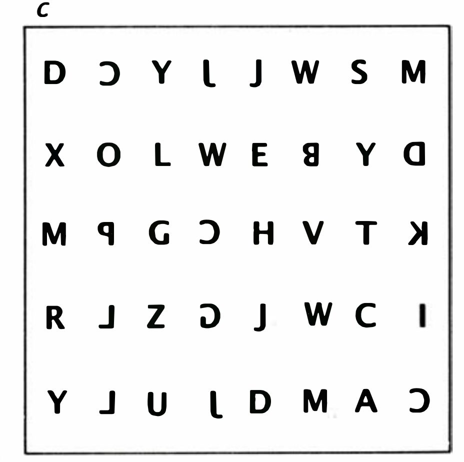
párvulos y los pacientes con lesiones cerebrales perciben la forma a partir del sombreado; por ejemplo, ¿responderíaun niñito a unas esferas dispuestas de suerte que sugiriesen un rostro?

Otra notable capacidad de la percepción visual reside en la aptitud para detectar la simetría. Esta aptitud vige aun para formas bastante complicadas, tales como plantas, rostros o manchas de tinta a lo Rorschach. ¿Cómo se las arregla el sistema visual para detectar la simetría? ¿Es que compara todos los rasgos individuales de un lado con todos los del otro lado para determinar si un objeto es simétrico? ¿O bien agrupa los rasgos reuniéndolos en formas más significativas y después busca la simetría en esas formas? Nuestra siguiente demostración trata de responder a estas preguntas.

Comparamos dos series de círculos sombreados [*véase la figura 8*]. Los observadores solían percibir la serie de la izquierda como esferas y cavidades dispuestas simétricamente en torno a un eje horizontal. Pero un examen más detenido revela que la mitad inferior del conjunto no es una imagen especular de la mitad superior. La verdaderamente simétrica es la serie de la derecha. Estos resultados implican que







6. AGRUPAMIENTO PERCEPTIVO de rasgos elementales. Gracias al mismo, podemos distinguir la figura de un perro dálmata destacándose de un fondo moteado en una fotografía de alto contraste (*a*). Las rayas inclinadas pueden ser agrupadas y vistas como si ocupasen un plano distinto del correspondiente a las rayas verticales (*b*). En cambio, las letras especularmente invertidas no pueden agruparse visualmente ni separarse en absoluto de las normales (*c*).

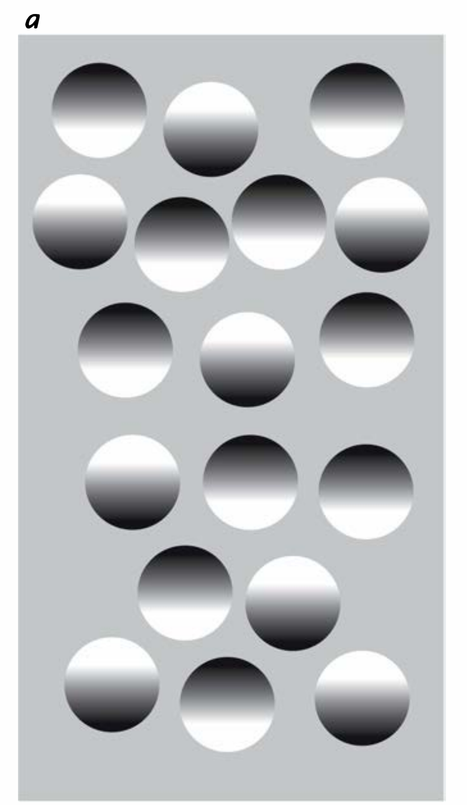
la percepción de la simetría no se basa en la simple distribución de áreas brillantes y oscuras en la imagen, sino en la forma tridimensional. Para comprobarlo, basta con girar 90 grados la ilustración y así eliminar la fuerte impresión de relieve. Se verá entonces que el conjunto de la derecha es más simétrico que el de la izquierda.

Nuestras observaciones sugieren que la umbroinformación se extrae en un momento precoz del proceso visual. Nada impide que haya incluso canales neurales específicamente encargados de tal tarea. Recientemente, Terrence J. Sejnowski y Sidney R. Lekhy, de la Universidad Johns Hopkins, plantearon la posibilidad de que tales células existan, basándose en trabajos hechos mediante simulación computerizada. Comenzaron con una "red neural" que constaba de tres capas de células: una capa de entrada, otra oculta y una última de salida. Las células de la capa de entrada se modelaron imitando los receptivos campos de células "dispuestas en torno al centro" que hay en el ojo del gato. Un algoritmo de aprendizaje ajustaba la intensidad de las señales que iban pasando de las células de una capa a las de la siguiente, y, al cabo de 40.000 ensayos, la red pudo asociar correctamente las formas sombreadas con sus tridimensionales ejes de curvatura.

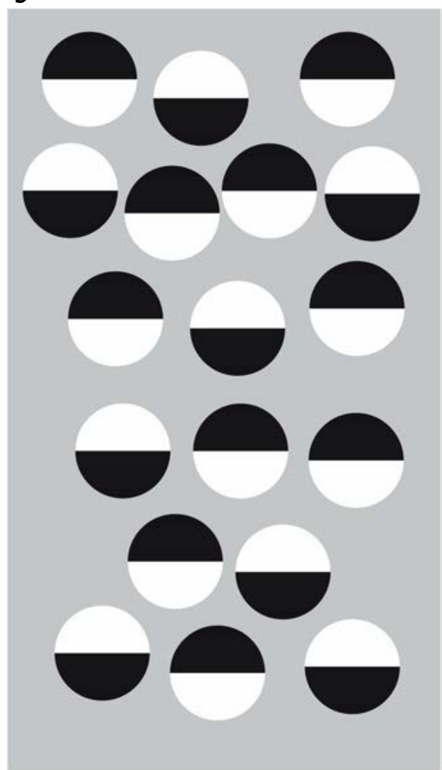
Lo que sucedió a continuación constituyó una sorpresa: los investigadores examinaron las respuestas de las células de la capa oculta y hallaron que respondían a barras de diferentes longitudes, anchuras y orientaciones, pareciéndose extrañamente a las células detectoras de límites que han sido halladas en el córtex visual de los gatos y de los monos. Con todo y ser fascinante esta simulación computerizada, no se ha puesto todavía en claro su pertinencia biológica, pues los investigadores excluyeron deliberadamente los contornos y otros indicios que se sabe que desempeñan un papel crucial en la visión humana. Queda por establecer si la semejanza entre las unidades ocultas y los detectores corticales de límites es mera coincidencia o si las células detectoras de límites sirven para derivar del sombreado formas tridimensionales.

Hasta aquí nos hemos ocupado de imágenes estacionarias. ¿Qué decir de los objetos en movimiento? Es bastante razonable asegurar que, en la naturaleza, cualquier cosa que se mueva acaba siendo presa o predador. Con-

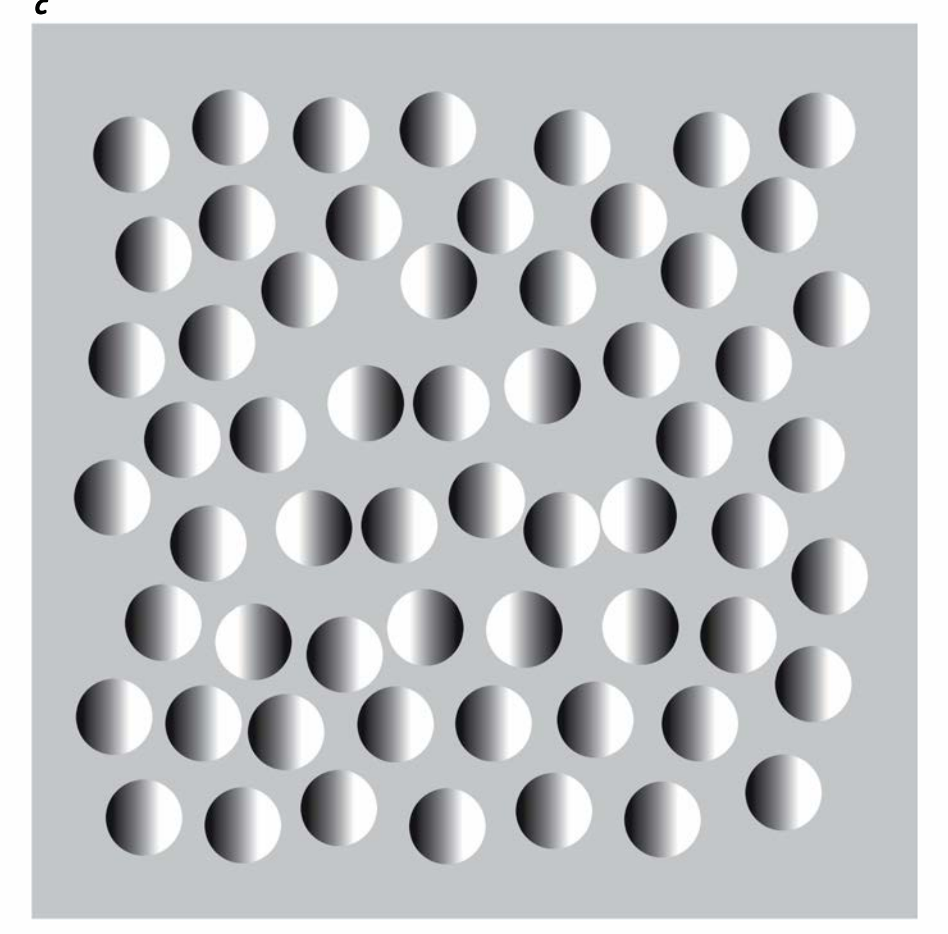
a



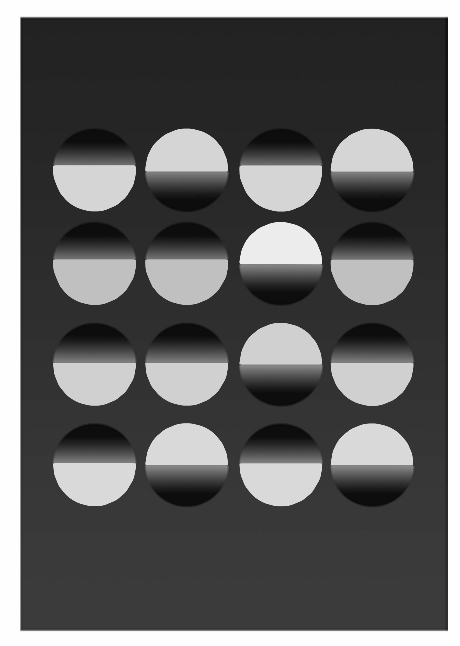
b

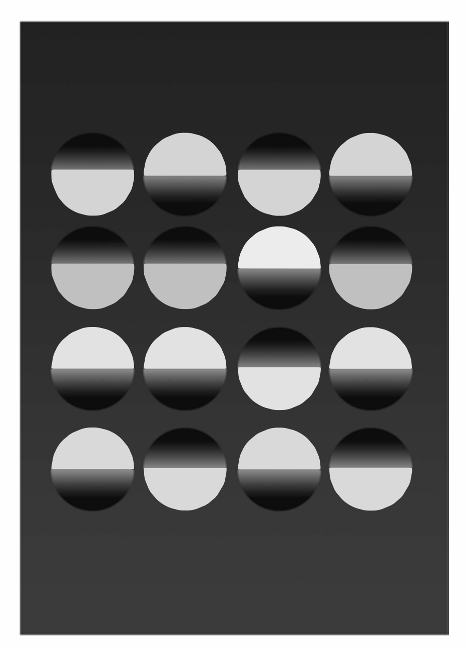


c



7. EL SISTEMA VISUAL entresaca, de las formas cóncavas, las convexas; y las agrupa (*a*). En un despliegue que presenta las mismas polaridades luminosas que el precedente pero no da información sobre el relieve (*b*) es imposible separar visualmente los objetos. En un despliegue iluminado lateralmente (*c*), el agrupamiento perceptual resulta más fácil cuando se hace girar el cuadro 90 grados. Los objetos convexos resaltan y forman un triángulo. El sombreado puede definir tales formas complejas para el ulterior procesamiento visual. Una idea parecida ha sido propuesta por Alex Pentland, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.





8. **PERCEPCION DE LA SIMETRIA. Ocurre cuando nuestro cerebro extrae la forma del medio sombreado. En el conjunto de la izquierda, esferas y huecos parecen estar en disposición simétrica con respecto a un eje horizontal. Sin embargo, en el plano la única simetría disposicional se da en el conjunto de la derecha.**

siguientemente, el sistema visual parece haber desarrollado un amplio abanico de mecanismos para detectar el movimiento. Las pruebas sugieren que en la capacidad para ver el movimiento intervienen grupos especializados de células cerebrales. El mecanismo que nos capacita para percibir el movimiento, ¿puede también sacar partido de la información proporcionada por el sombreado? Para averiguarlo, decidimos explotar una conocida ilusión denominada movimiento aparente [véase "Percepción del movimiento aparente", de Vilayanur S. Ramachandran y Stuart M. Anstis; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1986].

Un caso sencillo de movimiento aparente se produce encendiendo en rápida alternancia dos puntos luminosos separados espacialmente. En vez de ver las dos luces que se encienden y se apagan, se suele ver una única luz que salta atrás y adelante. Para investigar qué papel desempeñan los umbroindicadores en la percepción humana del movimiento, montamos un experimento en el que se iban alternando rápidamente un encuadre que mostraba un objeto sombreado como convexo sobre otro como cóncavo y otro encuadre en el que los objetos estaban situados a la inversa. Pues bien, once observadores espontáneos dijeron ver una esfera que saltaba arriba y abajo entre dos hoyos del fondo.

El resultado sugería que el cerebro computaba primero la forma tridimensional, antes de percibir el movimiento aparente. En efecto, los observadores tardaban a veces decenas de segundos en desarrollar una impresión de relieve, y durante ese tiempo no veían el movimiento aparente. Por tanto, parecía improbable que el movimiento aparente se basara en algún otro rasgo más primitivo de la imagen. Para demostrarlo por una vía más directa, hicimos girar el montaje 90 grados. Esto redujo considerablemente la impresión de profundidad y trajo consigo una pérdida casi completa del efecto de movimiento aparente.

El sistema visual, pues, parece obtener un objeto tridimensional a partir de los umbroindicadores y percibir el movimiento basándose en la imagen tridimensional, en vez de emplear directamente la imagen bidimensional "primitiva". Ciertas células del córtex visual del mono responden al movimiento aparente de estímulos simples tales como los puntos de luz arriba descritos. Podría ser interesante ver si esas células respondían al movimiento basándose en objetos cuya forma se percibe a partir del sombreado.

Está claro que la percepción visual cuenta con una constelación entera de procesos biológicos para llegar a una representación tridimensional del mundo. Para crear esta representación, parece ser que el sistema visual adopta varias hipótesis simplificadoras, como la de que suele haber sólo una fuente luminosa. ¿Qué ocurre cuando el sistema visual trata de construir una escena coherente con muchos fragmentos dispares? Patrick Cavanagh, Diane Rogers-Ramachandran y el autor realizaron recientemente un estudio con miras a responder a esa pregunta.

Dispusimos al azar unos sencillos conjuntos de galones, cada uno de los cuales podía verse como dos caras adyacentes de un cubo [*véase la figura 9*]. El conjunto *a* puede percibirse como unos cubos paralelos orientados todos en la misma dirección e iluminados por una única fuente de luz; los paralelogramos negros se perciben como la cara en sombra de los cubos. Pero con la misma frecuencia se observa este conjunto como una serie de blancas "estelas sepulcrales" que proyectan sombras negras. Cambiando mentalmente la dirección de la fuente luminosa, se puede pasar de ver cubos a ver estelas sepulcrales. Adviértase que, cuando se ve cada una de las figuras del conjunto como un cubo, se ven también todas las demás como cubos. Es imposible, de hecho, percibir a la vez algunas de las figuras como cubos y las otras como estelas, pues tal percepción violaría la regla de la unicidad de la fuente luminosa. Interesa señalar que, cuando las formas son percibidas como cubos, hay una tendencia a completar las caras que faltan, o sea, a percibir superficies ilusorias. Cuando las formas son vistas como estelas funerarias, desaparecen las superficies ilusorias.

A continuación, invertimos al azar o dimos la vuelta aproximadamente a la mitad de los galones, en combinaciones varias. Estos nuevos despliegues ilustran la sutil interacción entre reglas constringentes y organizantes que se da cuando el cerebro trata de crear formas significativas partiendo de fragmentos sueltos. En el conjunto *b*, por ejemplo, todos los galones parecen cubos paralelos, aunque ello sea incompatible con la unicidad de fuente luminosa. Por lo visto, cuando la regla de la unicidad de tal fuente no puede cumplirse, es sustituida por una regla "de apuntamiento" (o por una que diga que las formas con orientaciones similares son superficies paralelas). Para evitar el conflicto, el cerebro se limita a suponer que los cubos tienen caras de distinto color.

En el conjunto *c* veréis una mezcla de estelas fúnebres y cubos, porque esto le permite al sistema cumplir la regla de la unicidad de fuente luminosa. En realidad, es imposible ver el despliegue como si constara de cubos o de estelas, pues tal percepción sería incompatible o con la regla del apuntamiento o con la de la fuente de luz. Os hallaréis también unificando todos los puntos del despliegue de modo que constituyan una sola superficie cohe-

rente, algo así como una labrada placa de metal con unos cuantos "resaltos" distribuidos al azar sobre ella. Mientras que una hormiga que se trasladara sobre el cuadro vería sólo caóticas fluctuaciones de la intensidad luminosa, el ojo humano contempla la imagen entera y suelda las superficies paralelas para crear orden y unidad espaciales.

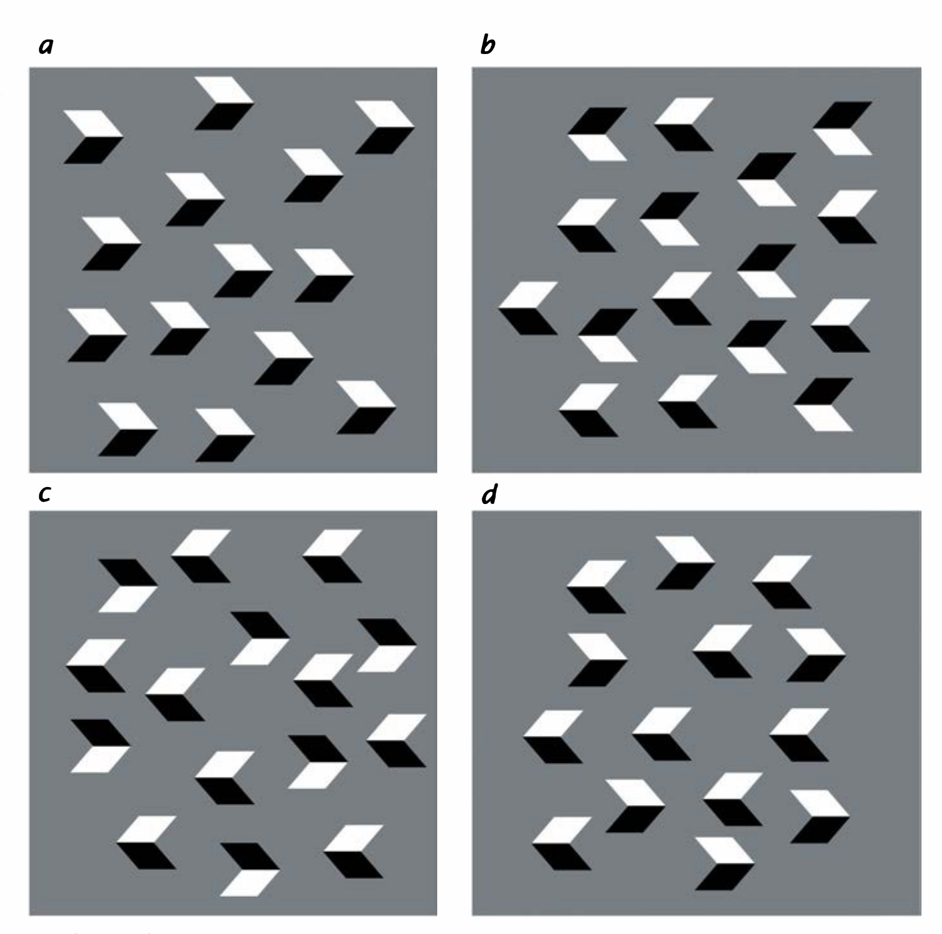
En el conjunto *d* las figuras no son ni paralelas, ni capaces de satisfacer la exigencia de la unicidad de fuente luminosa. De ahí que haya una tendencia a ver el despliegue como azarosa reunión de galones planos que apuntan en direcciones opuestas. Aun cuando una figura concreta del despliegue pueda ser vista a veces como un cubo o como una estela sepulcral, es difícil unir todas ellas en una interpretación tridimensional coherente.

En el mundo real, la imaginería visual —esto es, el conocimiento de alto nivel sobre lo que uno está viendo— afecta profundamente a la percepción de la forma a partir del sombreado. A decir verdad, el de la interacción entre la imaginería visual y la percepción es uno de los apartados de la psicología más elusivos y enigmáticos. Para ilustrar este punto, creamos una serie de círculos sombreados que, en inspección casual, parecen formar filas alternas de esferas y cavidades [*véase la figura 10*]. Sin embargo, la muestra es susceptible de otra interpretación radicalmente distinta: se la puede ver como una lámina gris en la que se han abierto 16 orificios y detrás de la cual hay dos bandas difusamente sombreadas. Este cambio perceptual hace que los círculos sombreados pierdan su forma esférica.

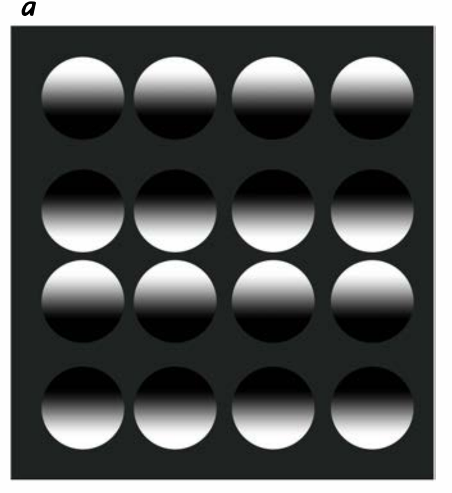
La tendencia a ver bandas, más que esferas y cavidades, puede intensificarse por indicadores estereoscópicos. En el cuadro *b* podéis ver unas esferas, pero si las "fusionárais" binocularmente mirándolas a través de un visor estereoscópico veríais un enmarque con una ventana circular destacándose claramente de un fondo sombreado. Mirándola así se hace imposible ver la forma circular como esfera en vez de como abertura. Esto supone que la obtención de la forma a partir del sombreado viene poderosamente condicionada por el procesamiento estereoscópico.

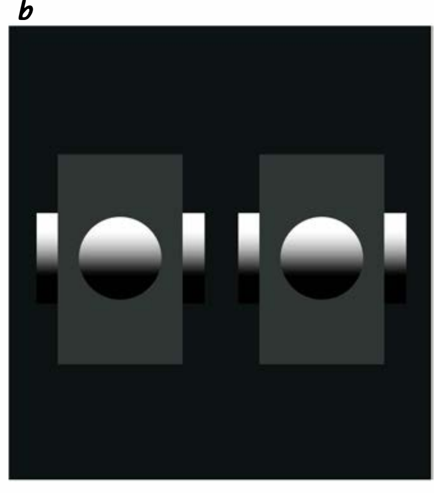
La interpretación de la forma a partir del sombreado interactúa también con el conocimiento de objetos logrado por el sistema visual, según lo demuestra la ilustración primera de este artículo. En esas fotografías las partes hundidas de las máscaras están iluminadas desde arriba, por lo que sería de esperar que pareciesen ahuecadas, cóncavas. Pero el sistema visual rechaza enérgicamente la posibilidad de que tales formas sean cóncavas e interpreta las imágenes como rostros normales iluminados desde abajo. Así, el sistema visual anula el supuesto de la iluminación desde arriba, para interpretar las formas como caras normales.

Fijémonos ahora en los dos pequeños discos sombreados que hay entre los maxilares de las dos máscaras. Aun-



9. LOS GALONES del grupo *a* aparecen como ilusorios cubos o como "estelas sepulcrales" que proyectan sombras, todas iluminadas por el mismo ángulo. En el grupo *b*, una regla de "apuntamiento" parece derogar la regla de la unicidad de fuente luminosa; la imagen se ve como una serie de cubos cuyas caras tienen diferentes reflectancias. El *c* es visto como una mezcla de cubos y estelas sepulcrales, porque esta interpretación cumple la regla de la unicidad de fuente luminosa. El grupo *d* se caracteriza por su ambigüedad.





10. LA IMAGINERIA VISUAL, o información de alto nivel acerca de los objetos, influye profundamente en la percepción de la forma a partir del sombreado. Filas de esferas y cavidades (*a*) pueden también ser vistas como dos bandas difusamente sombreadas y observables a través de 16 orificios abiertos en una lámina opaca. Nunca más podrán verse ya las formas esféricas. En (*b*) pueden verse las imágenes de dos esferas, pero cuando se las "fusiona" mediante un visor estereoscópico, desaparecen las esferas y sólo se percibe una ventana circular recortada en una lámina rectangular que flota delante de un plano sombreado.

que se supone que la luz les llega a los rostros desde abajo, el disco de la derecha es visto generalmente como convexo y el de la izquierda como cóncavo —como si ambos estuviesen iluminados desde arriba. Quizás el cerebro trate estos objetos como siendo totalmente distintos de los rostros en cuestión y, por tanto, al interpretar su sombreado, se sujete a la regla más "primitiva" de que han de estar iluminados desde arriba. Sin embargo, cuando los discos son pegados sobre el pómulo de uno de los rostros, el relieve se torna ambiguo: el disco de la derecha puede parecer cóncavo y el de la izquierda convexo. Finalmente, cuando se difuminan los contornos de los discos fusionándolos más con la mejilla, se los ve como estando iluminados desde abajo, igual que el resto de la cara. En consecuencia, el disco de la derecha viene a parecer un hoyuelo y el de la izquierda una hinchazón o un tumor.

Nuestra investigación ha puesto de manifiesto que hay varias reglas que se aplican desde los comienzos del procesado visual de la forma a partir del sombreado. Hemos demostrado que se puede rastrear el curso de la información desde los estadios iniciales de la percepción de la forma hasta el estadio final, donde la información interactúa con el conocimiento de alto nivel de las fuentes de luz y de la naturaleza de complejos objetos tridimensionales. Los mecanismos neurológicos que intervienen en este proceso humano se hallan aún envueltos en el misterio, pero la indagación psicológica puede servir de ayuda para dilucidar la naturaleza de los mismos y cómo se organizan dentro del cerebro. Su desarrollo está lanzando la investigación sobre la percepción visual hacia nuevos dominios en los que algún día quizá se logre descubrir los mecanismos celulares del cerebro que nos capacitan para percibir el mundo en tres dimensiones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ROLE OF FRAMES OF REFERENCE IN THE DEVELOPMENT OF RESPONSIVENESS TO SHADING. Albert Yonas, Michael Kuskowski y Susan Sternfels en *Child Development*, vol. 50, n.º 2, págs. 495-500; junio de 1979.

PERCEPTION OF SURFACE CURVATURE AND DIRECTION OF ILLUMINATION FROM PATTERNS OF SHADING. James T. Todd y Ennio Mingolla en *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 9, n.º 4, págs. 583-595; agosto de 1983.

PERCEPTION OF SHAPE FROM SHADING. V. S. Ramachandran en *Nature*, vol. 331, n.º 6152, págs. 133-166; 14 de enero de 1988.

Imágenes de rayos X obtenidas con máscaras codificadas

Utilizando una variante del estenoscopio, dotada con numerosas aberturas dispuestas de forma especial, se obtienen imágenes de fuentes de rayos X de alta energía tales como los plasmas de los reactores o los agujeros negros del espacio

Gerald K. Skinner

¿Cómo obtener la imagen de un objeto lejano que sólo emite rayos X? Los telescopios y las cámaras constituidas por lentes y espejos al uso resultan inútiles en este caso. Al contrario de lo que sucede con los fotones de la luz visible, la energía de los fotones de rayos X de bajas energías, suficientemente elevada, arranca electrones del material que constituye las lentes; los fotones resultan así retenidos por dichas lentes. Los fotones de rayos X de altas energías pueden atravesar estas lentes, pero, al no experimentar ninguna desviación apreciable en su recorrido, no se puede producir su focalización. Los rayos X de baja energía sólo pueden focalizarse en el caso de que incidan sobre una serie de múltiples superficies reflectoras bajo ángulos de incidencia rasantes. Ahora bien, la reflexión para incidencias rasantes pierde eficacia a medida que la energía de los fotones de rayos X aumenta y los ángulos para los que la reflexión puede tener lugar se hacen cada vez más pequeños. Por tanto, un telescopio de rayos X de altas energías necesitaría contar con superficies muy grandes; además, la obtención de dichas superficies con un grado de acabado y precisión adecuados resultaría prohibitivamente cara. En virtud de todo ello, la técnica de formación de imágenes por incidencia rasante no sirve para rayos X cuyas energías superan los 10.000 electronvolt, lo cual corresponde a fotones cuyas longitudes de onda son inferiores a 10 nanómetros. (Un nanómetro equivale a la milmillonésima parte del metro.)

¿Cómo conseguir, pues, imágenes de los objetos que emiten rayos X de alta energía? La formación de imágenes en este caso es posible merced a una técnica similar a la que se utiliza para obtener fotografías con rayos X en los hospitales. Para realizar estas fotografías se coloca una película con emulsión sensible a los rayos X directamente detrás del cuerpo, cuya parte delantera se irradia mediante una pequeña fuente "puntual" de rayos X. La película en cuestión registra la sombra producida por los componentes del cuerpo expuesto que absorben rayos X. En inglés se utiliza a veces un arcaísmo para designar la técnica de las radiografías: "skiagraphy", del griego "σκιά", que significa sombra.

Supongamos ahora que los rayos X no proceden de una fuente puntual, como serían los tubos de rayos X utilizados en medicina, sino de una fuente extensa cuya forma nos es desconocida en principio, quizás una nube de gran tamaño de plasma intergaláctico caliente. Dado que esta fuente extensa se puede considerar formada por numerosas fuentes puntuales, la sombra que produciría cualquier objeto interpuesto sería borrosa. La razón de este hecho estriba en que cada uno de los puntos componentes de la fuente extensa produce sobre la película una sombra ligeramente diferente de las demás. En el caso de que se conozca con precisión la forma del objeto interpuesto, se puede predecir fácilmente la forma de la sombra que dicho cuerpo produciría al ser iluminado por una fuente de rayos X única y puntual. Comparando las sombras producidas por todas las combinaciones posibles de fuentes puntuales con la sombra registrada realmente, reconstruiremos la forma de la fuente extensa.

Este es el principio en que se basa la técnica de formación de imágenes de rayos X con máscaras codificadas. El objeto interpuesto entre la fuente de rayos X y el detector es una máscara codificada: una placa opaca a los rayos X en la que existe una serie de agujeros. La clave de esta técnica de formación de imágenes radica en seleccionar una disposición de agujeros tal que permita reconstruir la imagen de la fuente de rayos X a partir de la forma de la sombra que produce la máscara.

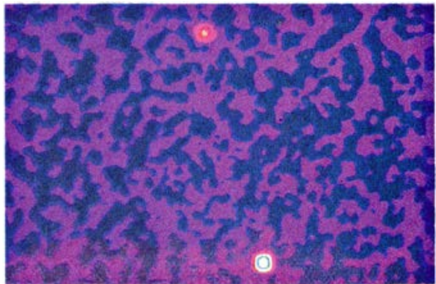
Una máscara con la disposición más sencilla posible –un orificio de pequeño tamaño– puede servir de ejemplo para representar la manera de proceder de esta técnica. A grandes rasgos, el sistema viene a ser una suerte de estenoscopio, una cámara provista de un pequeño orificio [*véase la figura 2*]. La sombra producida tras la máscara consistiría, en este caso, en una imagen de la fuente de iluminación invertida y ligeramente borrosa. Aunque ese estenoscopio podría trabajar con rayos X de alta energía, su utilidad en la práctica sería escasa. La obtención de imágenes nítidas sólo sería posible con un orificio pequeño, pero en este caso el número de rayos X que lo atravesarían sería también pequeño. En una hora, tan sólo un fotón de rayos X procedente de una fuente celeste típica atravesaría un orificio de un milímetro de diámetro practicado en una máscara que se moviera en órbita alrededor de la Tierra. Dado que el nivel de "ruido" de fondo (originado por la radiación cósmica) registrado por un detector de

GERALD K. SKINNER se halla adscrito al departamento de investigación espacial de la Universidad inglesa de Birmingham, donde se recibió de doctor en 1969. Ha trabajado en la detección y representación plástica de la radiación electromagnética, así como en su aplicación en física del estado sólido, astrofísica y medicina.

rayos X es bastante mayor que una unidad por hora, las máscaras de orificio único no constituyen un sistema eficaz de formación de imágenes para las fuentes de rayos X cósmicos.

Una solución obvia consiste en perforar la máscara varias veces, no una sola, puesto que el número de rayos X detectados tras la máscara es proporcional al número de orificios existentes en la misma. Desgraciadamente, cada orificio origina su propia imagen invertida y ligeramente borrosa; el detector recoge, por tanto, todas ellas. ¿Cómo se puede reconstruir una imagen única y nítida a partir de este conjunto de imágenes?

Para obtener una imagen reconocible a partir de una imagen compuesta, es necesario, en primer lugar, dividir el campo visual en múltiples celdillas elementales, o "pixeles". A cada una de estas celdas se les puede asignar un "valor de brillo" correspondiente al flujo de rayos X que emanan de la misma. Aunque cada celda emisora da lugar a una sombra de la máscara casi idéntica, la sombra originada por una celda está desplazada respecto a la sombra originada por otra. A partir de sencillas consideraciones geométricas, se puede determinar las posiciones relativas de las sombras producidas por cada celda emisora de rayos X.



1. DATOS proporcionados por un telescopio de máscara codificada y presentados en forma de una imagen "puntillista". Cada uno de los puntos que se ven representa el lugar en que un fotón de rayos X incide sobre un detector de forma rectangular. (La cruz que se observa en esta figura es el resultado de la existencia de un bastidor opaco situado sobre el detector.) Analizando los datos obtenidos con la ayuda de un ordenador, se obtiene una imagen de dos fuentes celestes de rayos X: GX3+1 y GX5-1.

Dado que una fuente de rayos X típica sólo puede representarse adecuadamente utilizando muchas celdas, la sombra registrada por el detector estará formada por una superposición de un número elevado de versiones desplazadas de la misma sombra de la máscara elemental. Pero podemos comparar la sombra registrada con la sombra que se formaría por parte de cada celda, si ésta fuera la única fuente de rayos X. La existencia de una estrecha semejanza (o lo que es lo mismo, para ser matemáticamente preciso, de un coeficiente de correlación elevado) entre la sombra que se formaría por una celda única emisora de rayos X y la sombra registrada realmente pone de manifiesto que la celda en cuestión es, de hecho, la fuente de un intenso flujo de rayos X. De manera análoga, si la semejanza es pobre, la contribución al flujo de esa celda en particular es escasa o nula.

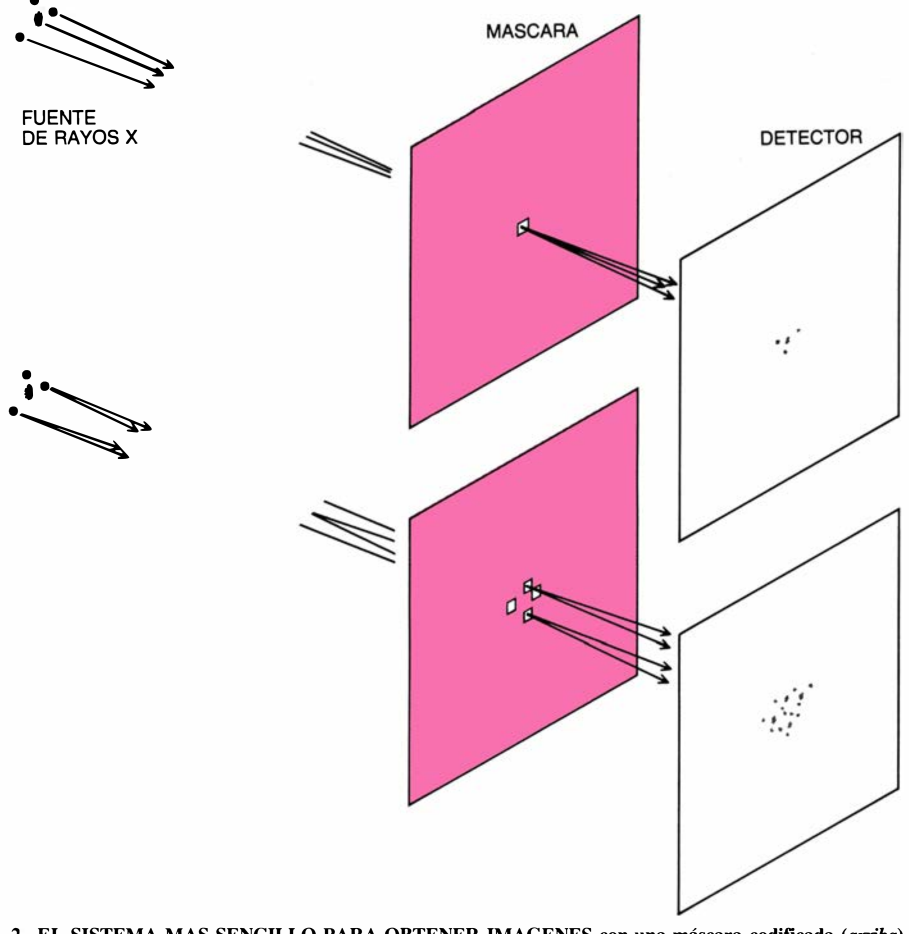
Procediendo así, y tomando en consideración todas las celdas, se puede construir una imagen. Dado que se tienen que manejar decenas de miles de fotones de rayos X detectados, y quizás un número similar de celdas, la cantidad de cálculos necesarios para obtener una imagen es enorme. Por fortuna para nosotros, las técnicas matemáticas que utilizan las denominadas transformadas de Fourier o Hadamard reducen bastante el tiempo de cálculo necesario y hacen factible esta forma de obtención de imágenes.

Como es natural, puede suceder que una máscara determinada produzca dos sombras similares al ser iluminada por rayos X procedentes de dos celdas diferentes. En tal caso, ambas celdas aparecerían brillantes en la imagen reconstruida, incluso en el caso de que sólo una de ellas hubiera emitido realmente los rayos X. En consecuencia, la selección de la disposición de los orificios en una máscara debe hacerse con sumo cuidado, de suerte que la sombra que se crea cuando una celda ilumina la máscara difiera tanto cuanto sea posible de la sombra producida por cualquier otra celda. En otras palabras, la sombra producida por la máscara en cuestión debe parecerse muy poco a la de cualquier otra versión trasladada de la misma.

En consecuencia, un reticulado regular de orificios no constituiría una elección adecuada: las simetrías de traslación de esta figura conducirían a imágenes que resultarían virtualmente indistinguibles de las versiones desplazadas de las mismas, introduciendo un alto grado de ambigüedad en la determinación del origen de los rayos X detectados. Una alternativa mucho mejor consistiría en que los orificios se distribuyeran al azar; esta disposición aleatoria es la que se ha utilizado en la práctica. Sin embargo, la opción de una disposición al azar no es realmente la mejor.

El problema que entraña la selección de la disposición de los orificios de una máscara presenta algunas analogías con problemas similares de otros campos de la ciencia y la ingeniería. Por ejemplo, los códigos digitales utilizados para enviar información a lo largo de las líneas de teléfono ruidosas deben diferir entre sí tanto cuanto sea posible, con el fin de que, si se alteran unos pocos bits de un mensaje, no se reciba un código totalmente erróneo. De modo análogo, los tests diseñados para comprobar la alineación de los sistemas ópticos deben trabajar de manera que cualquiera de ellos sea claramente distinguible de cualquier otra versión trasladada.

Las soluciones óptimas de este tipo de problemas se basan en los conjuntos de diferencias cíclicas. Un ejemplo nos ayudará a comprender mejor la naturaleza de esas entidades matemáticas. Dispongamos los números enteros del 1 al 15 en un círculo [*véase la figura 4*], de forma tal que al contar 15 intervalos de números enteros a partir del 1 volvamos al 1. Los números 1, 2, 3, 5, 6, 9 y 11, existentes en este círculo, muestran entre sí una curiosa relación. Hay tres casos en los que los miembros del grupo están próximos entre ellos (1 y 2, 2 y 3, 5 y 6). Hay también tres casos en los que los miembros del conjunto están separados por un intervalo (1 y 3, 3 y 5, 9 y 11). En realidad, si examinamos con cuidado esta disposición, vemos que en el círculo siempre hay tres pares de miembros separados por un número dado de intervalos, excepto para los múltiplos de 15. De modo análogo, cuando los miembros del conjunto se remplazan por agujeros y el círculo gira cierto número de intervalos,



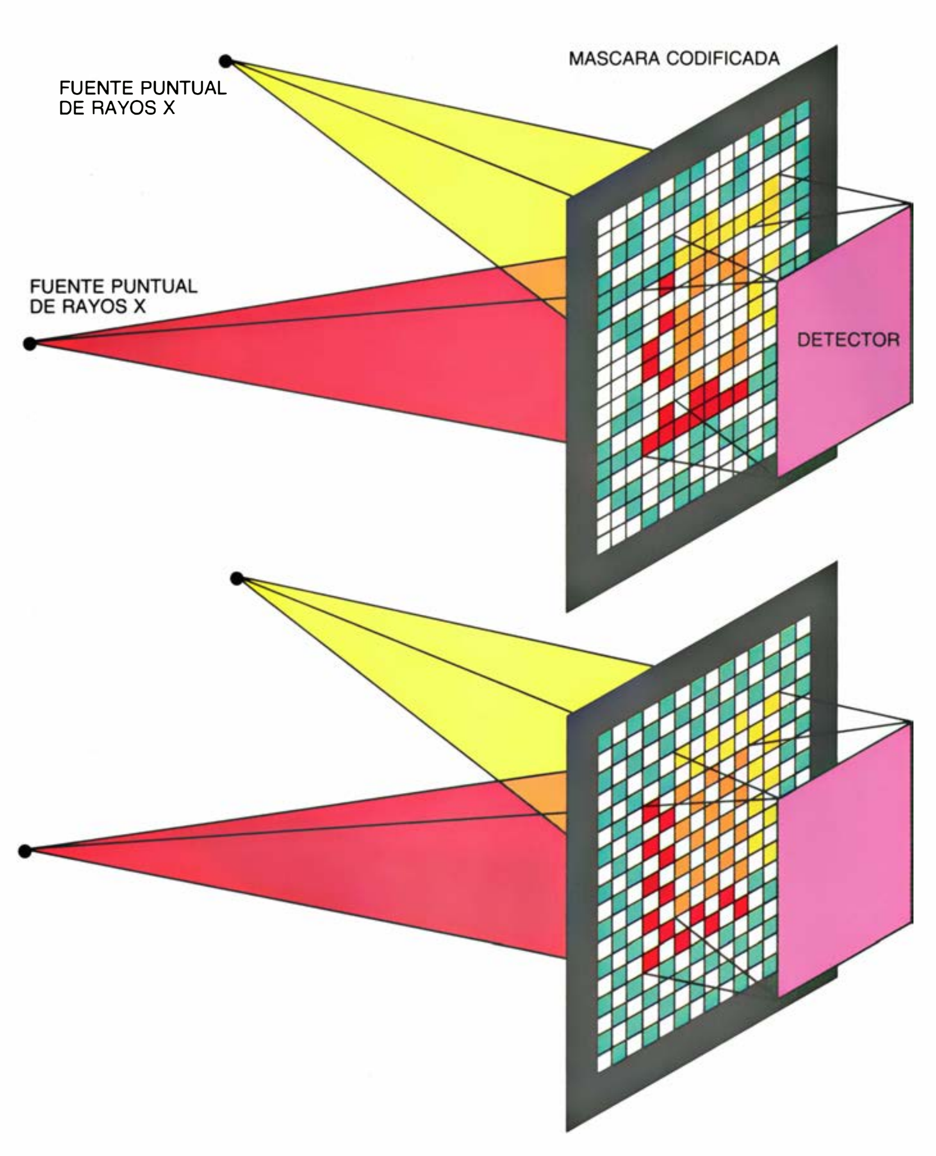
2. EL SISTEMA MAS SENCILLO PARA OBTENER IMAGENES con una máscara codificada (*arriba*) consiste en un detector de rayos X colocado detrás de una máscara, o placa opaca a los rayos X, perforada por un único orificio. Este sistema funciona de forma parecida a un estenoscopio. Solamente los rayos X que convergen sobre el agujero pueden llegar hasta el detector, donde crean una imagen invertida y algo borrosa de la fuente de rayos X considerada. Por ser escaso el número de rayos X que atraviesan el orificio, este sistema tiene poco valor práctico para la obtención de imágenes de fuentes de rayos X distantes o débiles. Una máscara perforada con más orificios (*esquema inferior*) permite que lleguen al detector más rayos X. Por desgracia para nosotros, cada orificio produce una imagen ligeramente desplazada de la fuente; en consecuencia, se hace necesario utilizar un ordenador para descomponer la imagen registrada por el detector.

tan sólo tres agujeros coincidirán, en general, con la posición inicial de los agujeros, lo cual no parece un resultado demasiado bueno si tenemos en cuenta que en el conjunto considerado existen siete agujeros. La excepción se produce cuando el círculo gira un número de intervalos múltiplo de 15, en cuyo caso la coincidencia resultante es perfecta: siete de siete.

Estas propiedades son las que hacen que los números 1, 2, 3, 5, 6, 9 y 11 constituyan un conjunto de diferencias cíclicas de base 15. Existen otros conjuntos de diferencias cíclicas que tienen otras bases y que conducen a números diferentes de agujeros coincidentes, pero todos ellos poseen la misma propiedad: cuando sus miembros giran cíclicamente, el ajuste resultante entre sus miembros es muy pobre, a menos que dicha rotación consista en una o más revoluciones completas.

Para obtener una figura de máscara codificada a partir de un conjunto de diferencias cíclicas de base n, se empieza por construir un reticulado regular constituido por una serie de líneas horizontales y verticales que guardan el mismo intervalo entre sí. A continuación, se numeran de 1 a n los cuadrados formados por la intersección de tales líneas. Con el fin de asegurar que las propiedades del conjunto de diferencias cíclicas se cumplan en un espacio de dos dimensiones, dicha numeración debe realizarse diagonalmente a lo largo del reticulado. Los orificios se crean en dichos cuadrados, que se numeran con un elemento del conjunto.

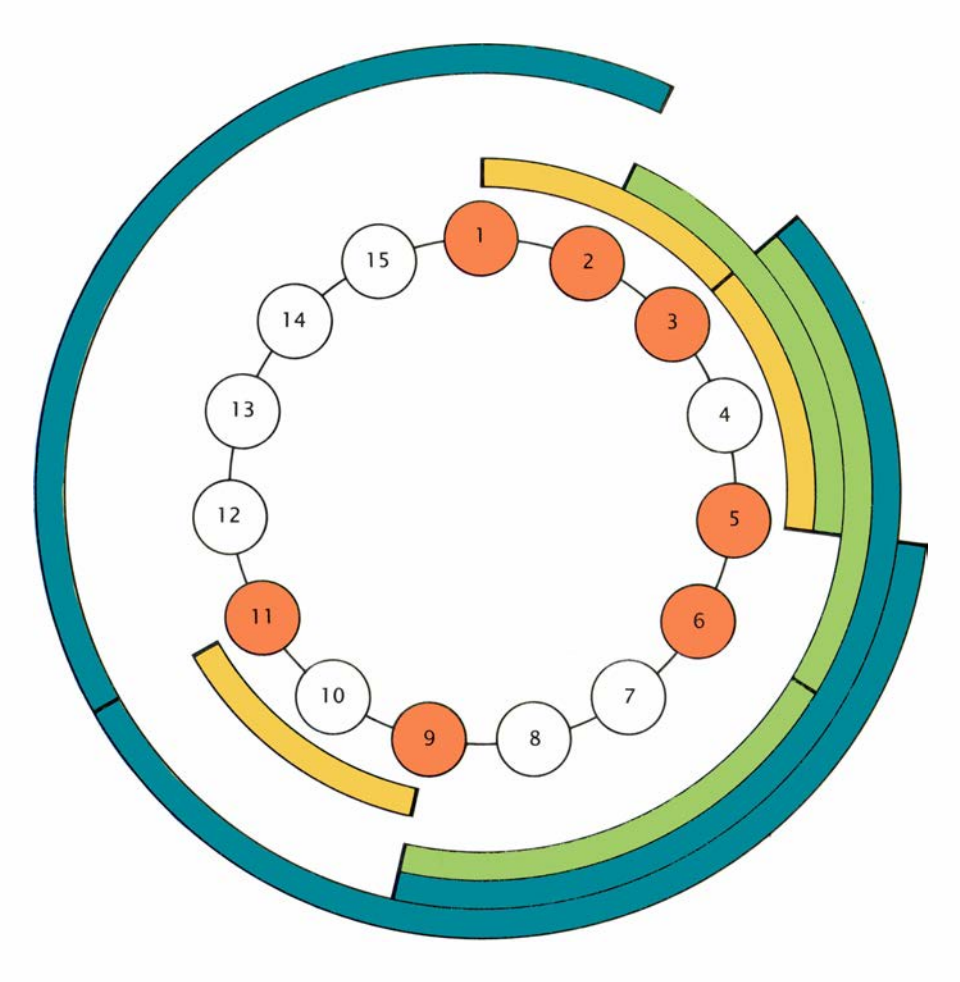
En la práctica, la figura básica de orificios se obtiene con la ayuda de un ordenador, que la repite cuatro o más veces y termina por transferir el resultado a una película fotográfica. Se puede construir con facilidad una gran máscara codificada proyectando esta película sobre una placa metálica recubierta con una sustancia sensible a la luz. El metal situado bajo las zonas expuestas a la luz (es decir, allí donde existan orificios) se puede disolver con la ayuda de un ácido. Para asegurarse de que el resto del metal es opaco a los rayos X, es a veces necesario utilizar en la fabricación de la placa algunos metales bastante exóticos, como el tántalo. De forma alternativa se puede proceder también a depositar sobre la placa base una capa de un material que sea un buen absorbente de los rayos X, oro, por ejemplo. Este método se ha utilizado para fabricar máscaras con más de 32.000 orificios.

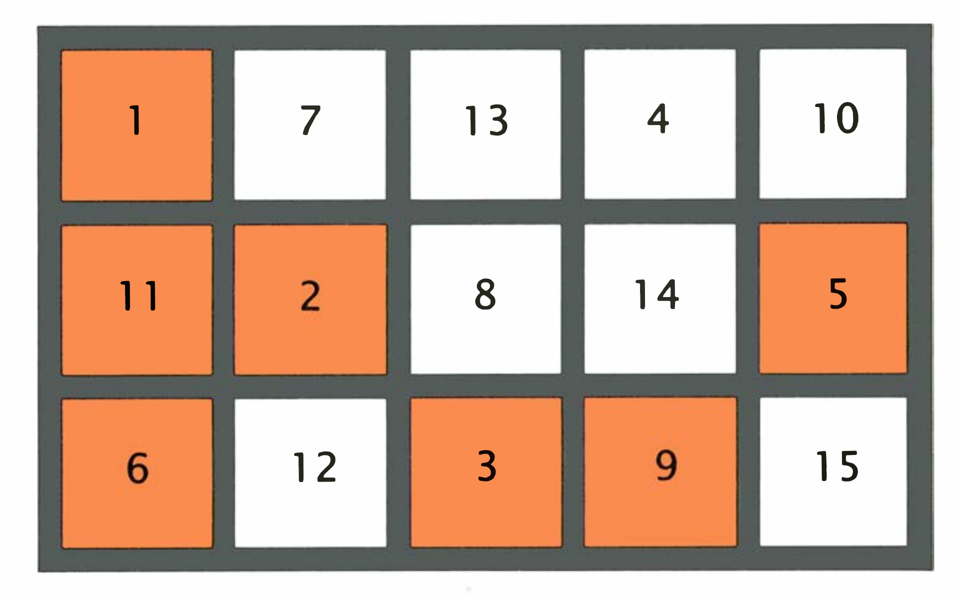


3. SISTEMA TIPICO DE OBTENCION DE IMAGENES CON MASCARA CODIFICADA (*arriba*); consiste en una máscara con una distribución de orificios conocida como "conjunto de diferencias cíclicas" (*véase la figura 4*). Cuando esta máscara se ilumina con una fuente de rayos X, proporciona una sombra que corresponde unívocamente a la forma de la fuente. La razón de ello estriba en que los rayos X que proceden de puntos diferentes producen sombras sobre el detector que pueden distinguirse entre sí, a pesar de que todas ellas sean versiones desplazadas de la misma forma básica. Por el contrario, las sombras que originaría una máscara cuyos orificios estuvieran dispuestos de forma regular (*esquema inferior*) resultarían virtualmente idénticas, con independencia del punto de la máscara iluminado. Aunque en esta figura sólo se representan dos fuentes puntuales, se puede suponer que una fuente de rayos X extensa se halla constituida por un número muy elevado de fuentes puntuales, cada una de las cuales producirá una sombra diferente.

¿Cómo se consigue el primer conjunto de diferencias cíclicas de base n? Estos conjuntos tienen que buscarse entre todos los números enteros comprendidos entre 0 y n, aunque existen ciertas reglas generales que ayudan a encontrarlos. En este sentido, los conjuntos de diferencias cíclicas se parecen a los números primos. (De hecho, algunos de los métodos empleados para encontrarlos se basan en hallar primero un par de números primos.) Se han identificado ya varias familias de conjuntos de diferencias cíclicas, y las máscaras basadas en ellos son muy diferentes [*véase la figura 5*]. Algunas de estas figuras se parecen a los rompecabezas y otras recuerdan ciertas pinturas del "op art". En algunas de ellas, el número de orificios es escaso, en tanto que en otras los orificios llegan a ocupar la mitad de las posiciones posibles del reticulado.

Aunque, para registrar la imagen de los rayos X que se origina en las máscaras codificadas, se podrían utilizar placas similares a las que se emplean para fines médicos, el uso de estas placas presenta muchos inconvenientes. Dichas placas no son sensibles a los flujos débiles de rayos X y no permiten distinguir los rayos X de diferentes energías, ni separar los rayos X de los rayos cósmicos. Por otra parte, la emulsión de estas placas se satura muy rápidamente: cuando un grano de la





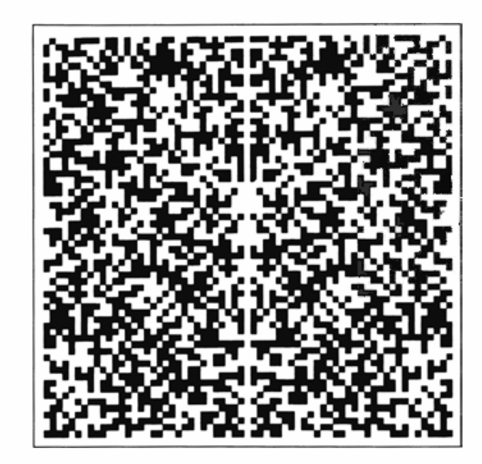
4. CONJUNTO DE DIFERENCIAS CICLICAS de base 15; incluye los números 1, 2, 3, 5, 6, 9 y 11, marcados en un círculo entre los números del 1 al 15 (*arriba*). Si el círculo gira dos intervalos, sólo habrá tres casos en que los miembros del conjunto coincidan con otros miembros en sus posiciones originales (*arcos de color amarillo*), lo cual es un resultado bastante pobre. Lo mismo sucede si el círculo gira tres intervalos (*arcos verdes*) o seis intervalos (*arcos azules*). De hecho, se producirán siempre exactamente tres correspondencias tras una rotación de cualquier número de intervalos, excepto si se trata de múltiplos de 15 (en cuyo caso el ajuste es perfecto). Esta es la propiedad fundamental que hace que estos conjuntos de números resulten útiles en la fabricación de máscaras codificadas: la rotación (o el desplazamiento) de los miembros del conjunto proporciona un ajuste o coincidencia muy pobre con su disposición original. Para fabricar una máscara codificada a partir de un conjunto de diferencias cíclicas de base *n*, se dibuja una serie de líneas verticales y horizontales para formar *n* cuadrados (*tablero inferior*). Los cuadrados se numeran en forma diagonal y se hace un orificio siempre que se encuentra uno de los miembros del conjunto. La figura básica se repite cuatro o más veces para obtener una máscara codificada completa. (Esquemas realizados por A. Christie.)

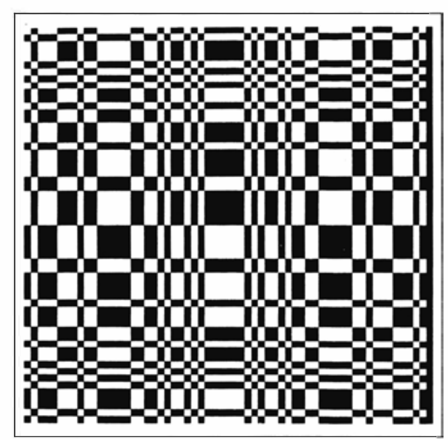
emulsión ha sido bombardeado por un fotón de rayos X, ya no responde al impacto de nuevos rayos X.

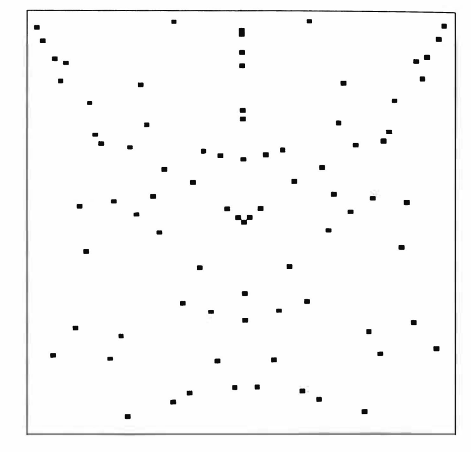
Por todas estas razones, para registrar la sombra de los rayos X producida por una máscara codificada, se utilizan contadores de gas proporcionales. Estos dispositivos sirven también para registrar la imagen producida en los telescopios de rayos X de incidencia rasante. Cada vez que un fotón de rayos X incide sobre este detector, se producen unos impulsos eléctricos cuya amplitud permite conocer la energía del fotón. Los contadores proporcionales son mucho más sensibles que las películas fotográficas; y su capacidad para discriminar energías permite estudiar el espectro de rayos X de un objeto. Por otra parte, es posible medir las pequeñas diferencias existentes en los tiempos de llegada de los impulsos producidos en cada cara del detector, lo que nos faculta para determinar en qué lugar ha incidido sobre el detector cada uno de los fotones de rayos X, con una precisión del orden del milímetro.

En consecuencia, los elementos básicos de un sistema de producción de imágenes con una máscara codificada son la máscara propiamente dicha, un contador proporcional sensible a la posición y un ordenador para procesar los datos obtenidos. La máscara se coloca a una distancia adecuada frente al detector y el conjunto se dirige hacia la fuente de rayos X cuya imagen queremos obtener. A continuación, se procede a registrar la figura de los rayos X que llegan al detector; si la máscara utilizada se ha seleccionado bien, obtendremos bastante información a partir de la sombra de rayos X que nos permitirá reconstruir una imagen de la fuente con la ayuda del ordenador.

Es interesante señalar que el conjunto máscara-detector se comporta, en cierto sentido, como una lente de aproximación o zoom, puesto que al variar la distancia entre el detector y la máscara se obtiene una serie de combinaciones diferentes de resolución y campo visual. Este conjunto se emplea también como telescopio para obtener imágenes de fuentes de rayos X distantes y como cámara para obtener imágenes de objetos cercanos que emitan rayos X. En ambos casos, los datos se registran igual. La única diferencia entre los dos casos radica en pequeñas disparidades entre los factores numéricos de los cálculos realizados en el ordenador para procesar los datos. De lo que se trata, en esencia, es de enfocar







5. FIGURAS BASICAS DE MASCARA CODIFICADA: presentan aspectos muy diversos, de acuerdo con los conjuntos de diferencias cíclicas de los que derivan. Los ejemplos ilustrados en esta figura se han obtenido ennegreciendo los cuadrados que representan los emplazamientos de los virtuales orificios del reticulado, con un total de 4095 cuadrados (*izquierda*), 3599 cuadrados (*centro*) y 6643 cuadrados (*derecha*). Dado que los orificios tienen el mismo tamaño que el espaciado del reticulado, en las dos primeras figuras los orificios adyacentes se han unido para dar lugar a orificios grandes de forma regular o irregular.

el sistema de producción de imágenes con máscaras codificadas utilizado en cada caso después de obtener dichas imágenes.

Una de las aplicaciones de estos sistemas de producción de imágenes se da en la investigación sobre fusión nuclear, en la que se estudian las propiedades de los plasmas a temperaturas extremas. Cuando la temperatura del plasma se acerca a la necesaria para que se produzca la fusión, la energía radiada tiende a serlo en forma de rayos X. La obtención de las imágenes de estos rayos X permite analizar el tamaño y forma del plasma, así como las variaciones de su temperatura. Otra posible aplicación se da en el ámbito de la medicina. Las cámaras de máscara codificada pueden detectar las emisiones de rayos X y de rayos gamma de los fármacos marcados con elementos radiactivos, permitiendo que los investigadores vean la absorción de dichas sustancias y su distribución por el cuerpo, tras ser ingeridas.

Sin embargo, el mayor impacto de los sistemas de formación de imágenes de rayos X con máscaras codificadas corresponde a la astronomía. Por ironía de las cosas, los astrónomos están interesados en los rayos X cósmicos porque la mayoría de las estrellas –y, en realidad, la mayoría de los cuerpos del universo– no emiten rayos X en gran cantidad. El descubrimiento de que ciertos objetos astronómicos sí emitían grandes cantidades de rayos X constituyó una sorpresa. (Este hallazgo es relativamente reciente, ya que la astronomía de rayos X tuvo que esperar el desarrollo de los cohetes, satélites y globos de gran altura, capacitados para transportar los sistemas de formación de imágenes a la estratosfera, con el fin de evitar la absorción de los rayos X en la atmósfera terrestre.)

El descubrimiento de rayos X procedentes de un lugar determinado del cielo pone de manifiesto que algo excepcional está sucediendo en ese lugar. Este hecho implica que allí existen plasmas a temperaturas altísimas (del orden de millones de grados) o que algunas partículas se están acelerando hasta energías mucho mayores que los valores usuales en las proximidades de las estrellas normales o de otros cuerpos comunes del firmamento. La lista de las clases de objetos que se conocen actualmente como emisores de rayos X abarca muchos de los fenómenos más exóticos del universo: supernovas, estrellas de neutrones, agujeros negros, plasmas intergalácticos muy calientes y núcleos de cuásares.

La mayoría de las imágenes de las fuentes de rayos X que se han obtenido hasta ahora lo han sido en los telescopios de incidencia rasante [*véase* "Observatorio Einstein de rayos X", de Riccardo Giacconi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1980] y, por tanto, se han limitado a las fuentes de rayos X de baja energía. Antes del desarrollo de los sistemas de formación de imágenes con máscaras codificadas, sólo podían estudiarse los espectros y las variaciones de intensidad de las fuentes de rayos X de alta energía. En la actualidad, los astrónomos pueden observar algunos de los procesos más energéticos que se conocen tomando imágenes de rayos X del cielo con la ayuda de telescopios dotados de máscaras codificadas.

La posibilidad de trabajar con un instrumento de máscara codificada en el espacio se puso de manifiesto en 1976, cuando un grupo de investigadores (con los que estaba asociado el autor) de la Universidad de Birmingham, en Inglaterra, situó en órbita un pequeño telescopio de rayos X con máscara codificada. La primera aplicación a gran escala de esta técnica tuvo lugar en 1985, cuando dos telescopios gemelos de rayos X con máscara codificada, construidos por el grupo del autor, fueron lanzados al espacio por los Estados Unidos, como parte del programa Spacelab 2.

Cada telescopio poseía una máscara diferente y las respectivas configuraciones resultaban óptimas para tareas un tanto distintas. El poder de resolución de un telescopio de máscara codificada, al igual que el de un estenoscopio, depende sólo del tamaño de los orificios y de su distancia al plano en el que se forman las imágenes. Los dos telescopios tenían una longitud idéntica, del orden de 3 metros (exactamente el espacio disponible en la bodega de carga de la lanzadera espacial), pero el tamaño de los orificios de la máscara de uno de los telescopios era muy pequeño (con un diámetro del orden de 2,5 milímetros), proporcionando una resolución de unos 3 minutos de arco, un valor aproximadamente igual a la décima parte del diámetro de la luna. Los orificios de la máscara del otro telescopio eran cuatro veces mayores y, por tanto, su resolución era inferior; en contrapartida, dicha máscara era más sensible a la emisión de rayos X de regiones difusas y extensas.

En el curso de una misión que duró ocho días, se obtuvieron imágenes procedentes de muchas fuentes celestes de rayos X, particularmente las que se identificaban con cúmulos galácticos y

con el núcleo interior de nuestra propia galaxia. Periódicamente, se procedía a analizar por ordenador los datos correspondientes a ciertas observaciones de referencia en el Centro Espacial Lyndon B. Johnson, de Houston, casi inmediatamente después de su obtención. Las imágenes pertinentes se utilizaban para controlar el funcionamiento del instrumento. Sin embargo, dada la naturaleza indirecta del sistema de producción de imágenes con máscaras codificadas, la bondad de los datos obtenidos sólo podía apreciarse terminada la misión.

El grupo de Birmingham, en colaboración con el laboratorio de investigación espacial de Utrecht, ha construido también un telescopio de máscara codificada de menor tamaño. Este telescopio es uno de los cuatro instrumentos para la astronomía de rayos X y rayos gamma existentes en el módulo Kvant acoplado a la estación espacial soviética *Mir*. Los instrumentos instalados a bordo del módulo Kvant permiten observar gran número de objetos y estudiar sus variaciones de luminosidad. Uno de los objetivos principales del telescopio de máscara codificada ha sido la supernova de la Gran Nube de Magallanes, que apareció fortuitamente tan sólo unas semanas antes de que se lanzara el módulo Kvant. El telescopio se ha utilizado en la investigación de la esperada emisión de rayos X por la supernova, a medida que los productos de la explosión se expandían y ponían al descubierto el núcleo de material radiactivo.

Las imágenes tomadas por los telescopios del Spacelab 2 y del Kvant han puesto de manifiesto muchas fuentes de rayos X desconocidas anteriormente, y están proporcionando un medio para estudiar la estructura de la emisión de rayos X para energías a las que este tipo de observación no era antes posible. Resulta particularmente interesante el hecho de que algunos rayos X procedan de una posición que coincide con el núcleo de nuestra galaxia, en el que, según algunos astrónomos, existiría un agujero negro de enormes dimensiones. Este objeto, un millón de veces más compacto que el Sol, podría proporcionar la energía necesaria para algunos de los procesos extremadamente energéticos que se han observado en dicha región.

A pesar de las ventajas que caracterizan los telescopios de máscaras codificadas, los telescopios de incidencia rasante resultan preferibles para la obtención de imágenes de fuentes de rayos X de bajas energías. Ante todo, estos instrumentos suelen ofrecer una resolución muy superior. Además, permiten dirigir la radiación X procedente de una región particular del campo de visión sobre una zona específica de un pequeño detector; como resultado, el ruido de fondo originado por la radiación cósmica y la radiación X procedentes de otras partes del campo de visión se puede reducir hasta un nivel muy bajo.

Sin embargo, los telescopios basados en las máscaras codificadas resultan muy valiosos en aquellos casos en los que, por una u otra razón, no pueden emplearse telescopios de incidencia rasante. La razón más frecuente estriba en la necesidad de obtener imágenes de fuentes de rayos X de altas energías, o quizás incluso de rayos gamma de bajas energías. Otra de las razones de su interés está relacionada con la necesidad de obtener imágenes para campos visuales muy grandes, como sucede en el caso en que se observen extensas superficies del cielo.

En principio, dado que la resolución de un telescopio de máscara codificada depende de su longitud, es posible alcanzar resoluciones altísimas mediante la construcción de telescopios más y más largos. Por este motivo, se está tomando en consideración la posibilidad de construir telescopios de centenares de metros de longitud, e incluso uno cuya máscara y detector se alojen en plataformas espaciales diferentes. La capacidad para unir grandes estructuras en el espacio podría facilitar la construcción de tales telescopios en el futuro; estos instrumentos permitirían estudiar, con mayor detalle que en la actualidad, la región del espectro electromagnético que corresponde a los rayos X y rayos gamma.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CYCLIC DIFFERENCE SETS. Leonard D. Baumert en *Lecture Notes in Mathematics*, vol. 182; 1971.

CODED APERTURE IMAGING WITH UNIFORMLY REDUNDANT ARRAYS. E. E. Fenimore y T. M. Cannon en *Applied Optics*, vol. 17, n.º 3, págs. 337-347; 1 de febrero de 1978.

HADAMARD TRANSFORM OPTICS. Martin Harwit y Neil J. A. Sloane. Academic Press, 1979.

X-AND γ-RAY IMAGING TECHNIQUES. En *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, vol. 221, n.º 1, págs 1-192; 15 de marzo de 1984.

El computador del Dr. Atanasoff

Durante décadas se ha atribuido erróneamente la paternidad del ordenador electrónico digital, honor que se reconoce por fin a un físico otrora olvidado, John V. Atanasoff

Allan R. Mackintosh

La historia va por fin a ser justa con John V. Atanasoff. Tras decenios de oscuro anonimato, este profesor jubilado de física, comienza a recibir, a sus 84 años, el reconocimiento de las ciencias de cómputo por algo que realizó hace casi medio siglo: la invención de la primera computadora digital electrónica. Hasta muy recientemente, los textos de historia de la informática atribuían a otros ese logro.

En tales relatos se afirma que los ordenadores que hoy conocemos tuvieron sus orígenes en el decenio de 1930 y en los primeros años cuarenta, época en que abundaron los ensayos, complementarios y en competencia mutua, de automatizar, acelerar y en general eliminar el fastidio y la monotonía de los cálculos de gran escala. Así, por ejemplo, Vannebar Bush, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, acabó en 1932 una computadora mecánica que efectuaba cálculos por medio de ruedas de engranaje y ejes giratorios. En los últimos años de la década de 1930, el alemán Konrad Zuse, George R. Stibitz, de los Laboratorios Bell Telephone, y Howard H. Aiken, de la Universidad de Harvard (este último con la colaboración de la International Business Machines Corporation, IBM) desarrollaron independientemente ordenadores "electromecánicos", en los que se utilizaban para la representación de números una serie de dispositivos controlados eléctricamente: relés. Las posiciones "cerrado" y "abierto" de los contactos del relé representaban los dígitos 0 y 1 del sistema de numeración binaria, cuya base es 2. (A diferencia del sistema de numeración normal, de base 10 y que para expresar números se vale de los dígitos del 0 al 9, en el sistema binario los números se representan mediante combinaciones de ceros y unos.)

En esos mismos textos se afirma luego que las primeras computadoras electrónicas se inventaron a mediados del decenio de 1940. A diferencia de los ordenadores mecánicos o electromecánicos, las computadoras electrónicas operan fundamentalmente gracias a dispositivos electrónicos: válvulas termoiónicas, transistores y, en nuestros días, microcircuitos; son los electrones y no las piezas del ordenador los que realizan casi todos los movimientos. Suele considerarse que la primera de esas máquinas fue Colossus, construida por los matemáticos Alan M. Turing y M. A. H. Newman y sus colegas del Bletchey Research Establishment, en Inglaterra. Colossus entró en servicio hacia 1943 y contribuyó a descifrar el código "Enigma" de los alemanes, lo que pesó decisivamente en el curso de la Segunda Guerra Mundial. El Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC, se considera el segundo ingenio. Construido por John W. Mauchly y J. Presper Eckert y sus colegas, de la Universidad de Pennsylvania, entró en servicio hacia 1945.

En realidad, entre 1937 y 1942, bastante antes de concebirse ninguna de las impresionantes e importantes máquinas mencionadas, Atanasoff había diseñado y fabricado dos ordenadores electrónicos menores. El primero fue prototipo de otro mayor que ha dado en denominarse Atanasoff-Berry Computer o, brevemente, ABC. Berry era el fallecido Clifford E. Berry, discípulo de Atanasoff e íntimo colaborador suyo desde 1939 hasta 1942.

El tardío reconocimiento del logro de Atanasoff no es fruto de una investigación académica, sino resultado incidental de un litigio jurídico que dio comienzo en 1967 entre la Sperry Rand Corporation y Honeywell, Inc. Sperry había comprado la patente del ENIAC y cobraba derechos de licencia a otros fabricantes de ordenadores electrónicos. Honeywell se negó a pagar y Sperry la demandó; por su parte Honeywell demandó a Sperry por violación de la legislación antimonopolio y por tratar de imponer una patente inválida.

Honeywell sostenía que la patente no era válida porque, al preparar el contencioso contra Sperry, sus abogados habían tropezado con una mención a Atanasoff. Cuando le localizaron, Atanasoff, que no había participado en la construcción del ENIAC ni conocía su funcionamiento en detalle, comparó la máquina con la suya propia. Se percató de que ciertas partes de la patente del ENIAC (que cubrían esencialmente todos los aspectos de la computación electrónica) se deducían del ABC y de la información que había compartido con Mauchly a principios del decenio de 1940.

Vivamente impresionado por el testimonio de Atanasoff, el juez Earl R. Larson, de la Audiencia Territorial de Minneapolis, concluyó el 19 de octubre de 1973 que la patente del ENIAC era inválida. Según los considerandos de la sentencia, "Mauchly y Eckert no inventaron por sí mismos el ordenador digital electrónico automático, sino que obtuvieron la materia objeto de litis de un tal Dr. John Vincent Atanasoff." Tanto durante la vista como posteriormente, Mauchly se negó a admitir que hubiera aprendido de Atanasoff nada de importancia. La viuda de Mauchly, Eckert y otros comparten también esa opinión pero, a mi juicio, los testimonios prestados durante la vista contradicen lo sostenido por Mauchly.

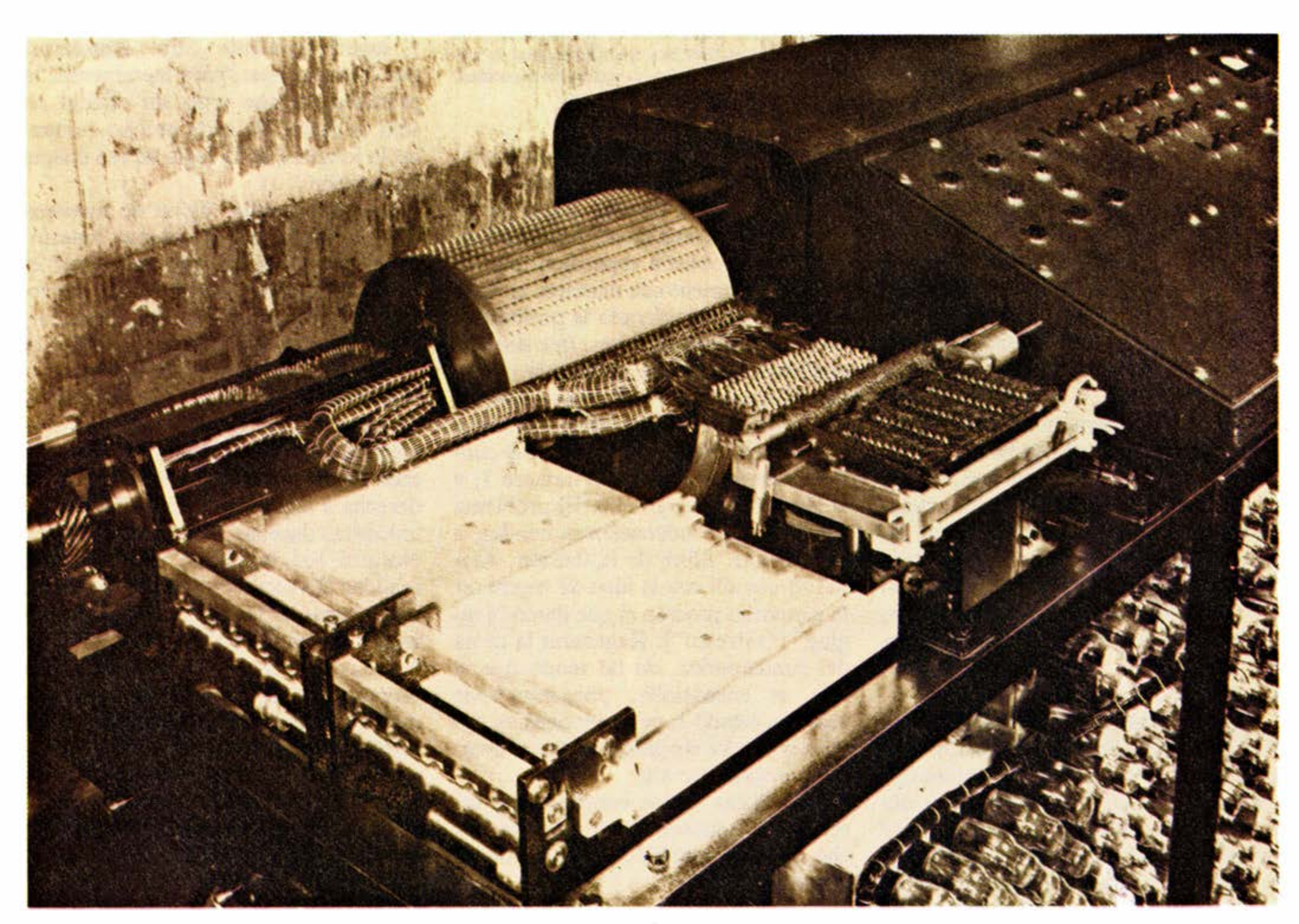
ALLAN R. MACKINTOSH ha enseñado física experimental del estado sólido en la Universidad de Copenhague desde 1970 y, desde 1986, dirige NORDITA, instituto escandinavo dedicado al estudio de la física teórica. Empezó a interesarse por la historia de Atanasoff en 1983, durante una visita a la Universidad estatal de Iowa; partir de entonces ha estudiado en profundidad los inicios históricos de los ordenadores electrónicos.

La decisión de Larson, que Sperry aceptó sin apelar, no trajo fama inmediata a Atanasoff, debido en parte a que los medios de información norteamericanos se encontraban a la sazón inmersos en el escándalo del Watergate, que obligaría a dimitir al presidente Richard M. Nixon. Sin embargo, lentamente se ha ido filtrando a través de la comunidad científica la importancia de las contribuciones realizadas por Atanasoff y hoy todos consideran que Atanasoff fue el primero que diseñó y construyó un ordenador electrónico digital. En buena medida, ese reconocimiento ha llegado gracias a los esfuerzos de Arthur W. Burks, quien participó en el desarrollo del ENIAC, y de su esposa Alice. Los Burk, respectivamente profesor y adjunta de investigación del departamento de ingeniería eléctrica y ciencias de cómputo de la Universidad de Michigan, investigaron a fondo el trabajo de Atanasoff en el ABC y lo describieron –junto con el juicio sobre la patente– en un artículo que ha ejercido gran influencia, y posterior y recientemente, en un libro.

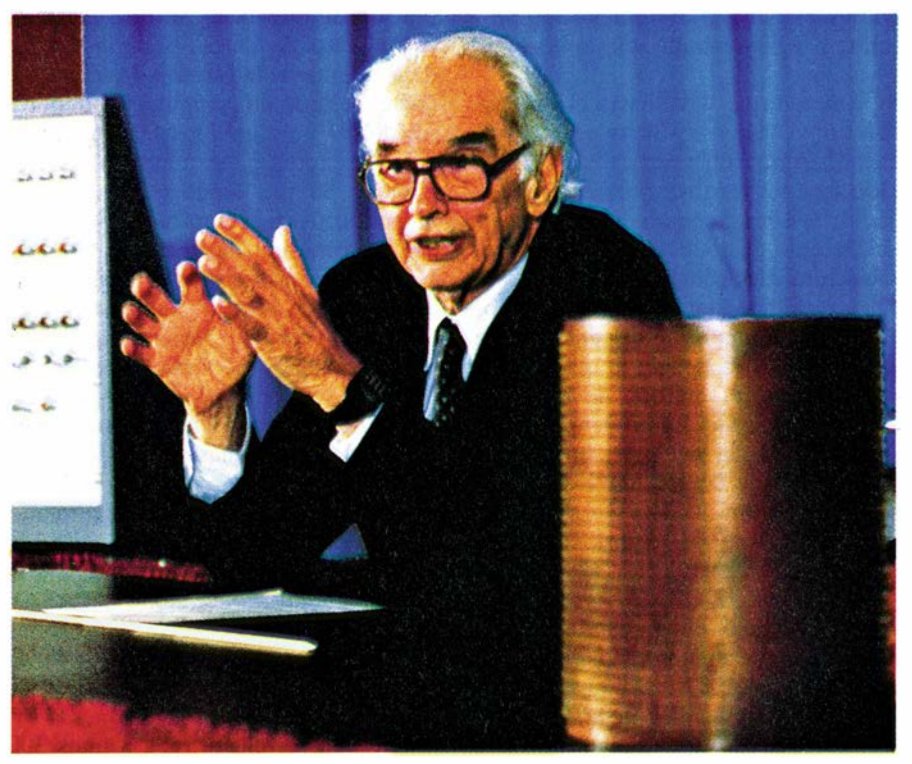
La senda que lleva hasta el ordenador Atanasoff-Berry se abrió cuando Atanasoff preparaba el doctorado en física teórica por la Universidad de Wisconsin en Madison, a finales del decenio de 1920. Su tesis, sobre la estructura electrónica del helio, obligaba a muchas semanas de laboriosos cálculos con una de las calculadoras de sobremesa de la época, lo que le hizo suspirar por un método de cómputo más automatizado. La preocupación de Atanasoff por tal idea persistió después de recibirse de doctor, en 1930, y comenzar el ejercicio docente en el Colegio estatal de Iowa (embrión de la futura universidad).

Durante varios años, en ese centro, Atanasoff siguió reflexionando sobre el modo de lograr tal automatismo. Hacia el invierno de 1937 tenía ya establecidos algunos principios generales. Por ejemplo, había determinado que la función de memoria, esto es, el almacenamiento de datos, debería ser independiente de la función de cálculo, y que el método de computación debería ser digital y no analógico; la máquina debería expresar los números con dígitos, y no por analogía con alguna magnitud física, como la distancia sobre la corredera de una regla de cálculo. Atanasoff tanteó también la idea de calcular en bases de numeración distintas de la base 10. Sin embargo, y según sus propias palabras, las ideas no parecían "cuajar", ni veía ninguna salida. Por fin, una noche de aquel sombrío invierno, Atanasoff realizó varios progresos decisivos.

La velada no empezó especialmente prometedora. En realidad, comenzó de modo tan frustrante que Atanasoff dejó el laboratorio, se subió al coche y echó a conducir a gran velocidad, abandonando Ames hacia el este. Se esforzó en concentrarse en la carretera, para distraerse de las preocupaciones. Horas después se encontraba a unos 300



1. COMPUTADOR ABC (Atanasoff-Berry Computer), construido entre 1937 y 1942 por Atanasoff, a la sazón profesor de física del Colegio estatal de Iowa (hoy universidad), con ayuda de Clifford E. Berry, uno de sus doctorandos. ABC no fue el primer ordenador digital diseñado; le precedieron varias máquinas que manipulaban números directamente en lugar de representarlos mediante magnitudes físicas, como la rotación de un indicador. El ABC fue, sin embargo, el primer ordenador que utilizó la electrónica (en forma de válvulas termoiónicas) para hacer funcionar el ordenador y abordar operaciones aritméticas; abajo, a la derecha, se distinguen algunas de esas válvulas. Presentaba otra novedad: los elementos de cómputo estaban separados de los elementos de memoria, ésta compuesta por condensadores montados en los grandes tambores de la parte trasera. Las bandejas situadas a la izquierda son lectoras de tarjetas perforadas.



2. ATANASOFF, durante la celebración de su octogésimo aniversario, en 1983, en la Universidad estatal de Iowa. En primer plano aparece un tambor de memoria del ABC, el único componente importante de su máquina que ha sobrevivido. Cada anillo de condensadores del tambor almacenaba un número de hasta 50 dígitos binarios, corrientemente llamados bits. El tambor almacenaba 1500 bits. En la actualidad, la memoria de un sencillo reloj calculadora, como el que lleva Atanasoff en la muñeca, decuplica esa capacidad.

kilómetros, en el estado de Illinois, y se detuvo en un establecimiento de carretera brillantemente iluminado a tomar una copa.

"Hacía un frío espantoso. Me quité el abrigo", rememoró en su deposición en el juicio. "Llevaba un abrigo muy pesado; lo colgué, me senté y pedí una bebida; mientras me la preparaban, me di cuenta de que ya no estaba tan nervioso, y mi pensamiento volvió otra vez a las máquinas de cómputo.

"Ahora bien, no sé por qué, entonces mi mente se puso a funcionar, cuando no había querido hacerlo antes; las cosas parecían estar bien; el lugar era tranquilo y agradable. Sospecho que tal vez había tomado dos copas, y entonces me di cuenta de que los pensamientos me llegaban bien y que tenía algunos resultados positivos."

¡Y tan positivos! Para realizar las funciones de control y de cálculo aritmético de su computadora, Atanasoff resolvió basarse en conmutadores electrónicos (dispositivos electrónicos que dirigen el flujo de las señales eléctricas) en vez de mecánicos. En este punto fue un auténtico pionero. Ninguna de las máquinas concebidas hasta entonces para resolver problemas matemáticos complejos se había basado en elementos electrónicos.

Resolvió igualmente que su máquina digital manipularía números binarios, y que operaría sobre tales números obedeciendo las reglas de la lógica y no las de recuento directo [*véase la figura 5*]. Esa misma tarde, Atanasoff resolvió un problema específico relativo al almacenamiento de números en base 2. Había ya considerado la posibilidad de utilizar condensadores, que son dispositivos capaces de almacenar carga, para desempeñar el papel de memoria del ordenador. Por ejemplo, una carga positiva en uno de los bornes del condensador representaría el número 1, y la ausencia de carga el 0. El problema era que los condensadores tienden a descargarse. Libre de la tensión, Atanasoff dio allí con la idea de regenerar la memoria, proceso al que llamó "jogging" ("refresco"). Regenerar la carga del condensador, de tal modo que si éste se encontraba, pongamos por caso, en estado 1, permaneciera en ese mismo estado, sin alterarse con el tiempo ni degradarse a 0.

Tras llegar a esas conclusiones, rememoró Atanasoff, "avanzada la noche volví al automóvil y regresé a casa con más calma".

Los ordenadores modernos siguen manipulando dígitos binarios almacenados electrónicamente de acuerdo con las reglas de la lógica y separan las funciones de computación y de memoria (regenerativa); vale la pena, pues, examinar con más detalle aquellas primeras decisiones de Atanasoff. ¿Por qué, por ejemplo, es preferible para la computación una máquina digital a otra de tipo analógico?

Se valorará mejor la finura intelectual de Atanasoff sobre este punto comparando el ABC con el analizador diferencial de Bush, la computadora científica más avanzada de la época. De naturaleza esencialmente mecánica, el analizador era además una computadora analógica; en ella, los resultados quedaban representados por la rotación de un eje.

Los ordenadores analógicos sirven para muchas aplicaciones. Ahora bien, proceden por medición de magnitudes y no por operaciones sobre números, lo que determina una inevitable pérdida de precisión. La computadora digital de Atanasoff alcanzaba fácilmente una precisión 1000 veces mayor que la posible con el analizador diferencial. Y, si era necesario, resultaba fácil aumentarla más todavía añadiendo dígitos. En el caso de las computadoras analógicas, el aumento de precisión es difícil y superlativamente caro. Pensemos, por ejemplo, que, para incrementar la precisión de una regla de cálculo en sólo un factor 10, sería preciso aumentar la longitud de la regla en esa misma proporción.

La computación digital de nuestros días se funda en el sistema binario. Como es obvio, no fue Atanasoff el único en pensar según estas líneas, pues las computadoras electromecánicas solían ser binarias, pero sí fue el primero en atinar con un medio electrónico de manipulación de los dígitos binarios. ¿Qué aspecto tiene un número escrito en base 2? En base 10, cada dígito del número representa, de derecha a izquierda, cierto número de unidades, decenas, centenas, millares, etcétera. Así, la cifra 237 representa en realidad 2 veces 10^2, más 3 veces 10^1, más 7 veces 10^0 (cualquier número, elevado a potencia 0 es igual a 1). En base 2, cada dígito binario (brevemente, bit) representa cierto número de unos, doses (2^1), cuatros (2^2), ochos (2^3), y así sucesivamente. Por consiguiente, el número denario 237 se representaría en base 2 como 11101101; contando ahora de derecha a izquierda, el número "contiene" una unidad de 2^7 (128 en el sistema denario), de 2^6 (64), 2^5 (32), 2^3 (8), 2^2 (4) y 2^0 (1) y ninguna unidad de 2^4 ni de 2^1.

Como es natural, el sistema de base 2 resultaría poco práctico para un uso cotidiano. Mas, por hallarse, todos los números, representados a través de 0 y 1, el sistema ofrece la decisiva ventaja de

permitir a los programadores la representación de cualquier número mediante una serie de elementos que se encuentren en uno de dos estados o modos: estados de carga o descarga de los condensadores de Atanasoff, o las magnetizaciones hacia "arriba" o "abajo" en un disco magnético.

Tras considerar diversas alternativas (válvulas termoiónicas y materiales ferromagnéticos, en los cuales es posible modificar las orientaciones de diminutos imanes elementales por medio de un campo magnético), Atanasoff decidió almacenar los dígitos binarios en condensadores. Optó por éstos en razón del precio, bastante barato, y porque podrían enviar señales a la unidad de cómputo sin necesidad de amplificación. Su decisión, lo mismo que la solución que dio a la recarga de los dispositivos de memoria, continúan influyendo en la computación contemporánea. En nuestros días, los condensadores son parte crucial de los microcircuitos que componen las memorias dinámicas de los ordenadores modernos, y el "refresco" ideado Atanasoff reviste vital importancia en el funcionamiento de la memoria.

El descubrimiento de un método para conservar la memoria en condensadores resultó crucial, pero el máximo logro de Atanasoff probablemente sea el desarrollo de un complejo conmutador electrónico: el circuito lógico. Hallándose en el hostal de Illinois, imaginó dos unidades de memoria, dos ábacos, como los llamó. Concibió entonces (son sus palabras) una "caja negra" —el circuito lógico— en la que penetrarían los números alojados en la memoria; basándose en reglas lógicas materializadas en el montaje, la caja negra produciría los resultados correctos de una adición o una sustracción de los números y los presentaría por los terminales de salida.

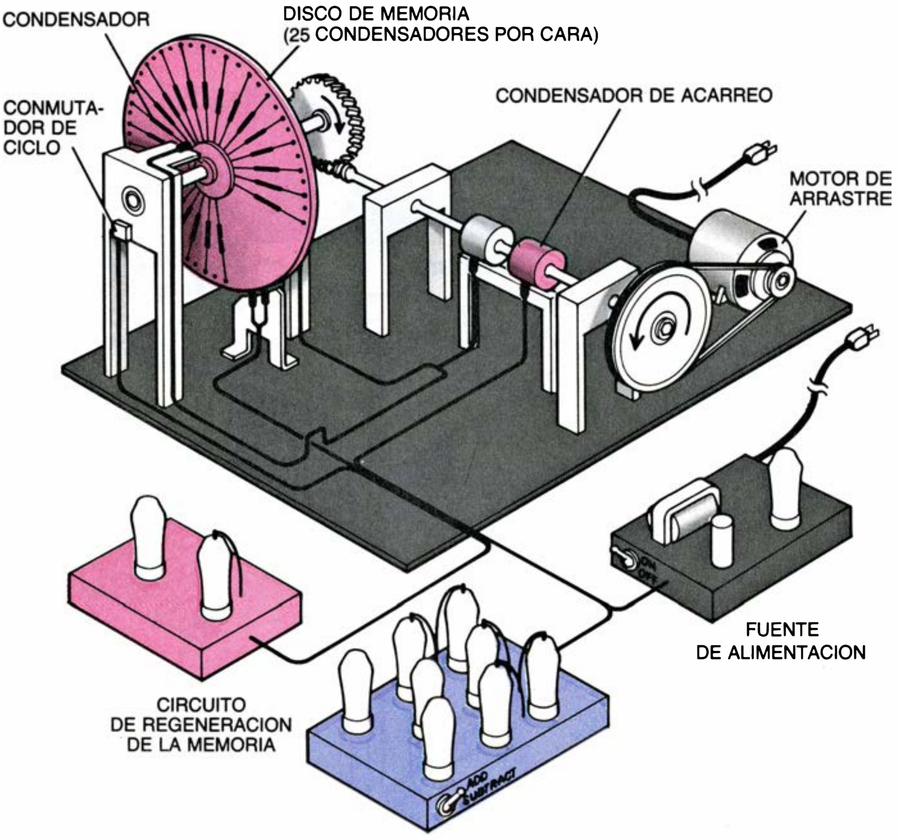
Decidió construir la caja negra valiéndose de válvulas termoiónicas. Las válvulas recibirían señales procedentes de los condensadores de las memorias, a las que bautizó ábaco de teclado y ábaco contador, por analogía, respectivamente, con las teclas y el carro móvil —el contador— de las calculadoras mecánicas de sobremesa utilizadas en aquella época. Las válvulas recibirían asimismo señales procedentes de otros condensadores que almacenarían los dígitos de arrastre (los que se "llevan" al ir sumando o restando). "Habiendo sido instruido por un hombre provisto de un soldador", el circuito lógico procedería entonces a seleccionar la respuesta correcta y a remplazar el contenido del contador con el resultado. Las válvulas electrónicas operarían tan rápidamente sobre la información que podría encargárseles que sumasen o restasen repetidamente los diversos dígitos de dos números cualesquiera almacenados en los ábacos. En nuestros días, los circuitos lógicos están empaquetados en pastillas diminutas ("chips"), muchísimo más céleres que las válvulas termoiónicas; pero realizan, en esencia, las mismas funciones que les asignó Atanasoff.

¿Qué ha sido de su otra gran decisión, a saber, separar las funciones de memoria y de procesamiento? También ese legado pervive. Los ordenadores modernos, por ejemplo un microordenador de sobremesa, posee tres elementos distintos: el sistema de entrada/salida, que comprende teclado, pantalla de visualización e impresora (Atanasoff se inclinó porque la entrada y la salida se efectuasen mediante tarjetas perforadas, utilizadas ya en las calculadoras de su tiempo); la unidad central de proceso, que realiza las operaciones de control y el proceso de los datos, y la memoria, que consta de componentes internos y externos (unidades de disco, por ejemplo).

Atanasoff estaba convencido de haber hallado los principios correctos de la computación electrónica, pero tenía plena conciencia de que la traducción práctica de esos principios iba a exigir un notable esfuerzo. En ese empeño recibió ayuda de Berry, que andaba tan obsesionado por la computación electrónica como Atanasoff. Este recordaba más tarde que, aun estando ambos muy ocupados, "no recuerdo que, ni una sola vez, nos faltara tiempo para la computadora; teníamos el corazón puesto de veras en esa aventura."

Comenzaron por construir un prototipo en miniatura para poner a prueba los elementos esenciales de la concepción de Atanasoff: los circuitos de lógica electrónica y la memoria binaria regenerativa. Se dieron prisa en la tarea. El prototipo se encontraba listo en octubre de 1939.

Portaba dos ábacos de memoria,



3. PROTOTIPO DEL ABC, construido en 1939 para poner a prueba dos ideas fundamentales. Atanasoff proyectaba recargar, es decir, regenerar, constantemente los condensadores de memoria, para que no perdieran su carga de modo impredecible. También planeó realizar los cálculos por medio de circuitos lógicos, esto es, sistemas de válvulas termoiónicas capaces de sumar o restar números binarios según reglas lógicas y no por recuento. El prototipo constituyó un éxito. Una vuelta del disco de memoria (*rueda rosa*), cuyos condensadores almacenaban por cada lado un número binario de 25 dígitos, determinaba que el único circuito lógico sumase o restase el número almacenado en una de las caras del disco al número de la otra cara. Mientras el circuito calculaba (almacenando o recobrando en el proceso los dígitos de arrastre positivo o negativo de un condensador encargado del arrastre o acarreo), el circuito regenerador refrescaba la memoria.

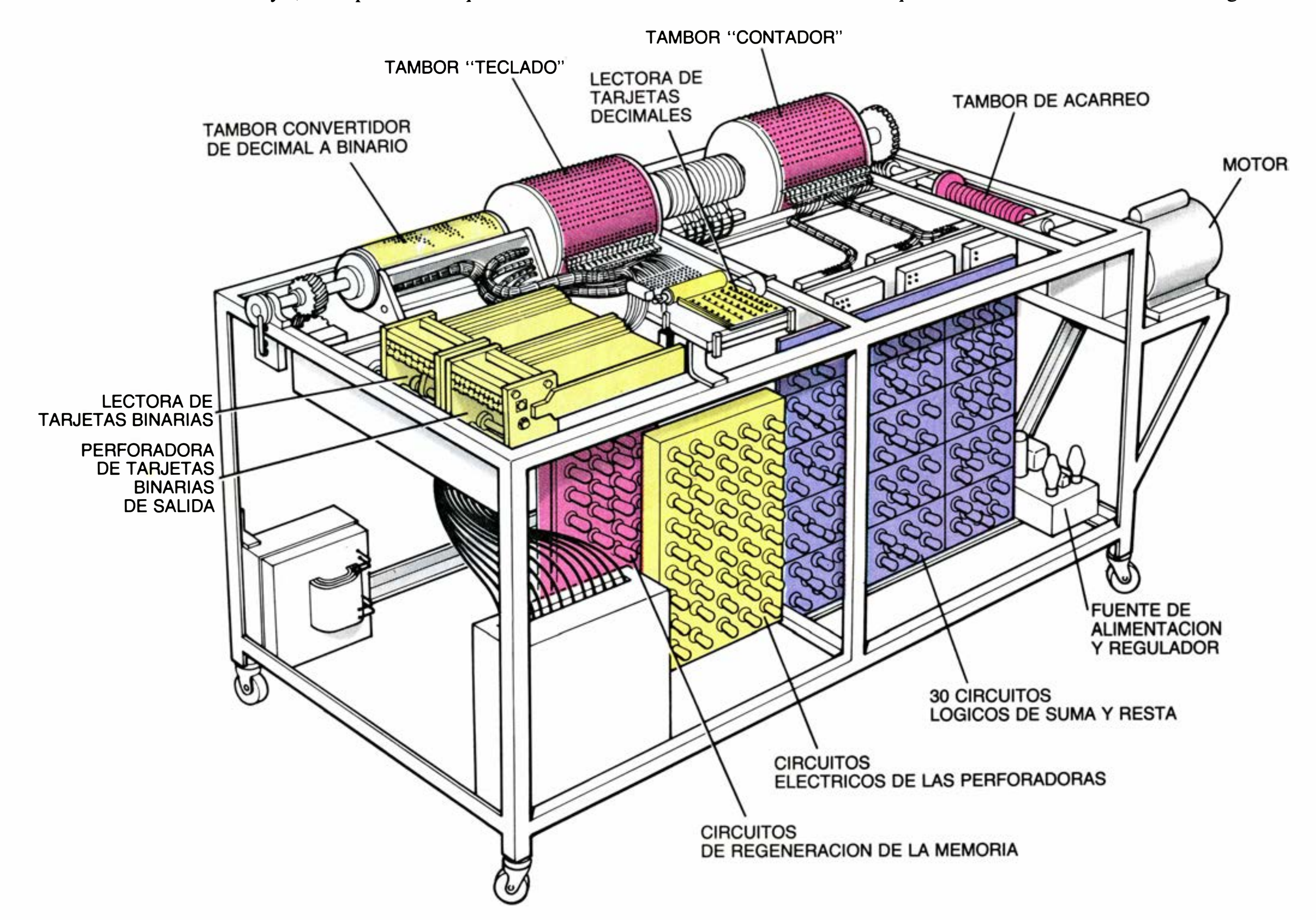
montados en las dos caras de un disco de plástico (bakelita). Cada ábaco constaba de 25 condensadores; tenía, por consiguiente, capacidad para albergar un número binario de 25 cifras, el equivalente de un número decimal de ocho. Atanasoff y Berry introducían los números binarios en los ábacos cargando a mano los condensadores que representaban el número 1 y dejando sin cargar los correspondientes al 0. Al pulsar un interruptor, el disco daba una vuelta y el circuito de lógica electrónica, dotado de ocho válvulas termoiónicas, leía los números de los ábacos. Con ayuda de un condensador que alojaba los dígitos de acarreo, el circuito procedía a sumar los números y depositaba la suma en el ábaco designado como contador, donde se leía manualmente. Al propio tiempo, un circuito de regeneración refrescaba el número del ábaco teclado.

El prototipo no era ninguna computadora impresionante, claro está; el viejo sistema de lápiz y papel corría más. Pero venía a ser ya, comparado con la actual computación electrónica, lo que el aeroplano de los hermanos Wright a la aeronáutica de nuestros días. Al poner de manifiesto la viabilidad de los principios ideados por Atanasoff, el prototipo inició el camino que llega al ordenador moderno.

Lo tenía ya todo para construir el ABC, cosa que ocurrió entre 1939 y 1942. Fue proyectado para realizar a gran escala una tarea computacional específica, muy frecuente en ingeniería y en física: la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Ejemplo de dos de esas ecuaciones es el par $2x + 5y = 9$ y $x + 2y = 4$, siendo x e y las incógnitas. Llamemos a a la primera ecuación y b a la segunda.

Como sin duda recordarán quienes hayan estudiado los principios elementales del álgebra, los sistemas de ecuaciones pueden resolverse por un método sistemático llamado reducción escalonada por filas, o método de reducción de Gauss, que viene a consistir en sumar o restar dos ecuaciones hasta que se anula el coeficiente de una de las incógnitas y, por consiguiente, ésta desaparece. En el ejemplo que nos ocupa, al restar por dos veces sucesivas a de b, el coeficiente 2 del término $2x$ se reduce a 0, quedando así la ecuación $y = 1$. Al sustituir y por 1 en la ecuación a de partida resulta $x = 2$. Fijémonos en que el proceso de restar por dos veces b de a equivale al de multiplicar b por 2 y restarla de a una vez; después de todo, la multiplicación no es más que una repetición de sumas.

Por supuesto, Atanasoff tenía puestas sus miras en un problema más complejo: pretendía resolver un sistema de n ecuaciones con n incógnitas; en particular, 29 ecuaciones con 29 incógnitas, $x1$ a $x29$. La solución de tales ecuaciones obedece al mismo esquema que el ejemplo anterior. Igual que entonces, se toman dos ecuaciones (sean, pongamos por caso, $2x_1 + 5x_2 - 3x_3 +$ ecuaciones obedece al mismo esquema $- 2x_4 + \ldots + 8x_{29} + 4$) y se le resta a una de ellas un múltiplo de la otra hasta que se elimine una de las incógnitas.



4. COMPONENTES DEL ABC, que se diseñaron con el propósito de capacitar a la máquina para resolver sistemas de 29 ecuaciones lineales, cada una con 29 incógnitas, de x_1 a x_{29}. Tales ecuaciones pueden resolverse sumando (o restando) repetidamente una ecuación de otra, hasta que se elimina una de las incógnitas. Se repite el proceso hasta obtener la solución, esto es, los valores de todas las incógnitas. Para llevar a cabo tales operaciones, el ABC leía los coeficientes de las incógnitas (como el 2 del término $2x_1$) en tarjetas previamente perforadas, las traducía a base 2 y cargaba los coeficientes de una ecuación en el tambor "teclado" de la memoria, mientras que los coeficientes de la otra se cargaban en el tambor "contador". En cada rotación de los tambores, los circuitos lógicos (a razón de siete válvulas por circuito) sumaban o restaban un par de coeficientes y situaban el resultado en el contador. Al mismo tiempo, los circuitos de regeneración de la memoria recargaban los condensadores del tambor teclado. Cuando el ABC eliminaba una variable designada, la máquina almacenaba los números restantes de la ecuación en tarjetas perforadas, para utilizarlos posteriormente. (Los dibujos del artículo son obra de George Retseck.)

Para eliminar x_1, pongamos por caso, habría que multiplicar la segunda ecuación por 2 y restarla de la primera, con lo que se obtendría la ecuación, llamada la eliminante, $x_2 - 11x_3 + 11x_4 + \ldots - 10x_{29} = 1$.

Repitiendo el proceso con pares de ecuaciones diferentes se generan 28 ecuaciones en las que se ha eliminado la incógnita x_1. La iteración del procedimiento con las 28 ecuaciones desprovistas de x_1 permite obtener 27 ecuaciones desprovistas de las incógnitas x_1 y x_2; se prosigue de este modo hasta dejar solamente una ecuación con una incógnita. Llegados a este punto se rehace el camino en sentido ascendente por la jerarquía de ecuaciones hasta determinar el valor de todas las incógnitas.

Se trata de un método directo y sencillo, pero que requiere un gran volumen de cálculo aritmético. Atanasoff estimó, con todo realismo, que la resolución de un sistema de 29 ecuaciones de 29 incógnitas por medio de una de las clásicas calculadoras de sobremesa llevaría unas 10 semanas de penoso afán, capaz de atontar la mente más despierta; según su estimación, su ingenio realizaría la tarea en una semana o dos.

Al objeto de llevar a la práctica su propósito de resolver sistemas de muchas ecuaciones, Atanasoff situó los ábacos teclado y contador sobre grandes tambores, en lugar de sobre un disco. Cada tambor contenía 30 números binarios, especificados cada uno con precisión de hasta 50 dígitos.

La máquina ABC efectuaba la eliminación de Gauss correspondiente a dos ecuaciones cada vez. Los coeficientes de las mismas, previamente perforados en tarjetas en notación decimal, se pasaban a base 2 mediante un tambor especialmente diseñado al efecto y se almacenaban en la memoria. En el tambor contador se guardaban los coeficientes de una de las ecuaciones y en el tambor teclado los coeficientes de la otra. En cada revolución completa de los tambores, que tardaba un segundo, los circuitos lógicos efectuaban una adición o una sustracción de los dos conjuntos de coeficientes. En particular, uno de los circuitos lógicos, que constaba ahora de siete válvulas, sumaba o restaba el coeficiente de x_1, pongamos por caso, depositando la suma o la diferencia en el contador. Al propio tiempo, los otros circuitos procesaban igualmente los otros pares de coeficientes. (Esta tarea, mediante la cual se realizan simultánea y paralelamente cierto número de operaciones idénticas, se conoce por operación vectorial; los ordenadores que las realizan se denominan procesadores vectoriales.) A la par, otros circuitos repasaban el ábaco teclado y refrescaban la memoria.

Posteriormente, una vez realizadas múltiples adiciones y sustracciones y eliminado un coeficiente determinado, la ABC perforaba en notación binaria el conjunto de coeficientes restantes (la eliminante) sobre tarjetas, que se guardaban hasta su requerimiento en una etapa posterior, en la que una lectora de tarjetas binarias trasnfería a la memoria la información que contenían. Calculadas todas las incógnitas en forma binaria, la lectora de tarjetas decimales funcionaba a la inversa, al objeto de traducir los datos binarios en números ordinarios.

El sistema de entrada y salida mediante tarjetas perforadas funcionó correctamente en los primeros ensayos; sin embargo, al incorporarla al ABC producía un error cada unas 10.000 operaciones de perforación o de lectura. No resultaría posible manejar satisfactoriamente grandes sistemas de ecuaciones (es decir, sin tener que efectuar amplias comprobaciones y repeticiones de los cálculos), si bien los sistemas pequeños podrían resolverse sin dificultad. Atanasoff y Berry estaban tratando de resolver ese problema relativamente trivial cuando la Segunda Guerra Mundial les obligó a abandonar los trabajos sobre el ordenador. Berry pasó a ocupar un puesto que retrasaba su incorporación a filas y Atanasoff fue destinado al Naval Ordnance Laboratory, de la Marina de los Estados Unidos.

Suele tomarse por incompleta la computadora que hubieron de abandonar. Más exacto sería definirla como un ordenador capaz de funcionar, aunque falible, cuya sección de computación electrónica —los circuitos lógicos— constituyó un brillante éxito. Habida cuenta de la celeridad con que se proyectó y construyó el ABC, puede aventurarse que el problema surgido en el sistema de tarjetas binarias se habría solventado rápidamente. Más todavía, habría resultado adecuado un sistema de entrada/salida desarrollado décadas antes por IBM que posteriormente se incorporó al ENIAC. Además, de haber tenido ocasión de exhibir la potencia del ordenador, Atanasoff habría recibido el apoyo económico necesario para rematar el proyecto.

Si él y Berry hubieran gozado de la posibilidad de continuar su proyecto, a buen seguro el ABC hubiera estado en pleno servicio en 1943. Pero sufrió, por contra, la suerte de casi todos los equipos envejecidos: víctima del canibalismo, sus piezas se aprovecharon para otros fines y terminó desguazado sin enterarse Atanasoff.

Si el ABC permaneció durante tanto tiempo en el olvido, ¿cómo han influido las ideas de Atanasoff en las ciencias de cómputo modernas? La respuesta nos señala hacia Mauchly, y tiene que ver también con la introducción de las innovaciones de Atanasoff en el ENIAC. El ENIAC difería considerablemente de la computadora ABC. Fue el primer ordenador electrónico de aplicación general, mientras que el ABC se había diseñado como máquina especializada en una sola tarea. (El ENIAC podía programarse para abordar problemas distintos modificando pertinentemente las interconexiones de un panel de control.) La máquina de Mauchly y Eckert era mucho mayor que la que fabricó Atanasoff; utilizaba millares de válvulas, no sólo unos pocos centenares, y era mucho más rápida, pues su memoria, electrónica, no dependía de tambores giratorios. Además, el ENIAC calculaba por recuento directo y no por medios lógicos; cálculos que efectuaba en base 10.

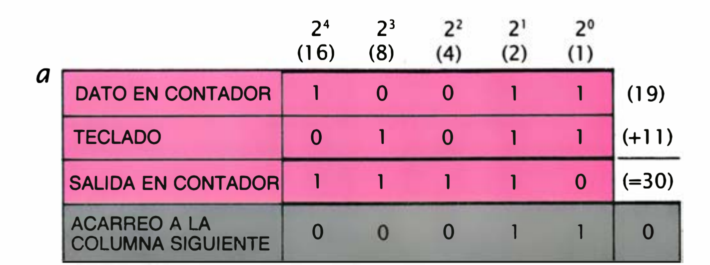
Sin embargo, salta a la vista que Mauchly y Eckert incorporaron al ENIAC los elementos básicos de la computación electrónica digital ideados por Atanasoff y que hicieron lo mismo en una computadora posterior, la EDVAC. Lo más obvio, que la ENIAC y la EDVAC se valían de conmutación electrónica para controlar el funcionamiento de la computadora; la EDVAC, por su parte, utilizaba también circuitos lógicos para realizar las operaciones aritméticas, que se efectuaban en base 2; asimismo recurría a la memoria regenerativa. Mauchly recibió también de Atanasoff la idea de que la electrónica digital posibilitaría la construcción de una máquina que efectuase cálculos con mayor velocidad y precisión que el analizador diferencial de Bush.

Atanasoff, que hacia mayo de 1941 "sabía que podríamos construir una máquina capaz de hacerlo casi todo en lo que a computación se refiere", decidió que el ABC podía convertirse en una analizador diferencial electrónico a raíz de que un colega del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) le comentara que los investigadores de ese centro estaban considerando la posibilidad de introducir elementos electrónicos en una nueva versión del analizador. Atanasoff le escribió a Mauchly acerca de tal posibilidad; ambos analizaron pormenorizadamente la

cuestión cuando Mauchly visitó a Atanasoff durante casi una semana, en junio de 1941. Durante aquella visita, Atanasoff le mostró el ABC, que entonces estaba casi listo para funcionar. Cuatro años más tarde, el ENIAC hacía realidad el sueño de Atanasoff.

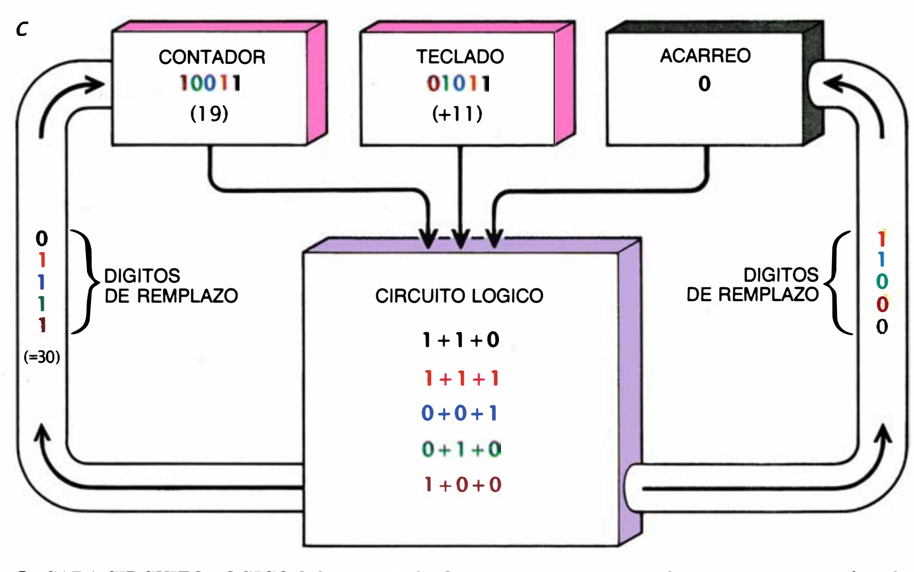
ENIAC y Colossus, que también era programable, prepararon el camino al paso siguiente del desarrollo del ordenador electrónico: la incorporación de un programa residente en la memoria. Este avance de los ordenadores de aplicaciones generales simplificó su programación y permitió que el programa actuase de distinto modo en función de los resultados de los pasos intermedios.

Desde que se introdujeron los primeros ordenadores de programa almacenado, a finales del decenio de 1940, los computadores han multiplicado su potencia y su velocidad. Su arquitectura no ha cambiado tanto, sin embargo. Se adivina la impronta del pasado en los usos a que se destinan algunos ordenadores. Así, ha revivido el interés por las computadoras para aplicaciones especiales, sobre todo entre los científicos que tienen problemas muy específicos que resolver. La verdad es que resulta asombrosa la semejanza entre el ABC y una computadora moderna para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales aunque, claro está, las máquinas modernas son enormemente más veloces.









5. CADA CIRCUITO LOGICO de la ABC sumaba dos números por vez, como los que vemos en este ejemplo (*a*), de acuerdo con las reglas establecidas en una tabla (*b*). Supóngase que deban sumarse el equivalente del número 19, situado en el contador, con el equivalente del 11, en el teclado. Tras convertir los números al sistema de numeración binaria, que los expresa en combinaciones de potencias de 2 (como 2^0, 2^1, 2^2, 2^3, o sea, 1, 2, 4, 8) los sumandos se escribirían 10011 (16 + 0 + 0 + 2 + 1) y 01011 (0 + 8 + 0 + 2 + 1). El circuito lógico operaría sobre esos números sumando en primer lugar los situados en la columna de la derecha (2^0). Para hacerlo, determinaría que la configuración de los dígitos de las memorias contador, teclado y arrastre (a saber, 1, 1, 0) coincidían con la antepenúltima línea de la sección "entrada" de la tabla. (El dígito de arrastre inicial siempre es 0.) A partir de la correspondiente sección de "salida", el circuito procedería entonces (*c*) a enviar un 0 (*negro*) al contador (donde se registraban los resultados), que remplazaría el 1 que allí estaba situado. También se enviaría un 1 (*rojo*) a la memoria designada para el arrastre o acarreo. El procedimiento equivale a determinar por recuento que 1 más 1 es igual a 2, y que el número 2, escrito en base 2 es 10. A continuación, el circuito sumaría de igual modo los dígitos de las sucesivas columnas.

No cabe duda de que a Atanasoff le hubieran sido reconocidas mucho antes su contribución a la informática si hubiera patentado sus trabajos. Como señalan los Burk, pudo reclamar para sí la noción misma de computación digital electrónica, así como la conmutación electrónica en los ordenadores, los circuitos para la adición y la sustracción lógica, la separación de las funciones de procesado y memoria, las memorias de tambor de condensadores, la regeneración de la memoria, la utilización del sistema binario de numeración en la computación, las unidades modulares, el procesamiento vectorial y el control sincronizado de las operaciones electrónicas, entre otras innovaciones.

Afirmar que se hubiera tratado de una de las patentes más importantes jamás concedidas no sería más que subestimar su trascendencia. Por desgracia, la confusión creada por la guerra y la ineficacia de las personas a quienes se confió la obtención de una patente impidieron que llegara a cumplimentarse una solicitud formal de patente para ninguna de las innovaciones de Atanasoff. Tampoco él emprendió los pasos necesarios para obtenerla porque se le hizo creer que el ENIAC se fundaba en principios muy diferentes de los del ABC y que tal máquina constituiría el modelo de las futuras computadoras, con lo que la patente sobre cualesquier idea o dispositivo de la ABC carecería de valor. Por si fuera poco, andaba profundamente sumergido en otros proyectos y, más tarde, en fundar su propia empresa de ingeniería.

Además de arrojar luz sobre uno de los grandes logros de la técnica, la historia de Atanasoff invita a unas cuantas reflexiones sobre la investigación científica. De entrada, la suerte del inventor no es siempre ni fácil ni cómoda. A pesar de sus muchos esfuerzos, Atanasoff sólo logró reunir 6000 dólares para construir el ABC, mientras que la financiación del ENIAC contó con un presupuesto de medio millón de dólares, dado su valor militar (entre otras

funciones, con el ENIAC se prepararon tablas de tiro para la artillería).

Invita también a pensar sobre la creatividad científica. El gran avance de Atanasoff en aquella noche invernal de 1937 ilumina el proceso creativo con notable claridad. Durante mucho tiempo estuvo luchando a brazo partido con su problema, sufriendo decepciones y sin apenas avanzar; pero su mente continuaba absorbiendo y elaborando información. Entonces, hallándose dedicado a una actividad totalmente diferente, le llegó la solución.

Los profanos podrían muy bien considerar que los 300 kilómetros de carretera que Atanasoff hizo hasta llegar al hostal no son más que un método estéril de echar un trago; en realidad, Atanasoff sabía muy bien lo que hacía. Se dio cuenta de que la mente necesita variedad y descanso para funcionar creativamente. Tras concebir ciertos principios fundamentales, dejó que entrase en juego "una especie de cognición". Tal confianza en la intuición puede no concordar con la noción común de que la investigación científica es una actividad estrictamente racional, pero constituye un camino seguido por muchos científicos e investigadores.

Finalmente, no es coincidencia que grandes progresos técnicos sean obra de investigadores de temas básicos. La actividad científica suele requerir la invención de herramientas nuevas, y los investigadores, profundamente sumidos en la resolución de problemas científicos, tienen motivo poderosísimo para afrontar el reto. Importa que comprendan con claridad esa conexión entre ciencia y técnica quienes defienden que puede limitarse el apoyo a la investigación básica sin que se frene el desarrollo tecnológico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ENIAC: FIRST GENERAL-PURPOSE ELECTRONIC COMPUTER. Arthur W. Burks y Alice R. Burks en *Annals of the History of Computing*, vol. 3, n.º 4, págs. 310-399, 1981.

ADVENT OF ELECTRONIC DIGITAL COMPUTING. John Vincent Atanasoff en *Annals of the History of Computing*, vol. 6, n.º 3, págs. 229-282; julio de 1984.

THE FIRST ELECTRONIC COMPUTER: THE ATANASOFF STORY. Alice R. Burks y Arthur W. Burks. University of Michigan Press, 1988.

ATANASOFF: FORGOTTEN FATHER OF THE COMPUTER. Clark R. Mollenhoff. Iowa State University Press, 1988.

THE FIRST ELECTRONIC COMPUTER. Allan R. Mackintosh en *Physics Today*, vol 40, n.º 3, págs. 25-32; mrza de 1988

Taller y laboratorio

Entretenidas lecciones de óptica para hacer más soportables nuestros viajes en avión

Jearl Walker

La lectura de *Science from Your Airplane Window*, de Elizabeth Wood, constituye un remedio infalible contra el aburrimiento durante los viajes en avión (a menos, claro, que uno vaya a parar a una de esas espantosas hileras de asientos interiores). El libro reúne una magnífica colección de experimentos y observaciones al alcance de cualquier pasajero. A lo largo de los años, yo mismo he ido reproduciendo muchas de sus experiencias y he garrapateado notas acerca de otras nuevas en los márgenes de las hojas. Este mes vamos a pasar revista a algunos de los resultados.

La ventanilla del avión se abre a múltiples lecciones de óptica. Las ventanillas suelen estar formadas por tres hojas. De éstas, las dos exteriores están muy próximas entre sí, montadas herméticamente en el marco, al objeto de que en la cabina se mantenga una presión agradable cuando el avión vuele a gran altitud. La tercera hoja protege a las otras dos.

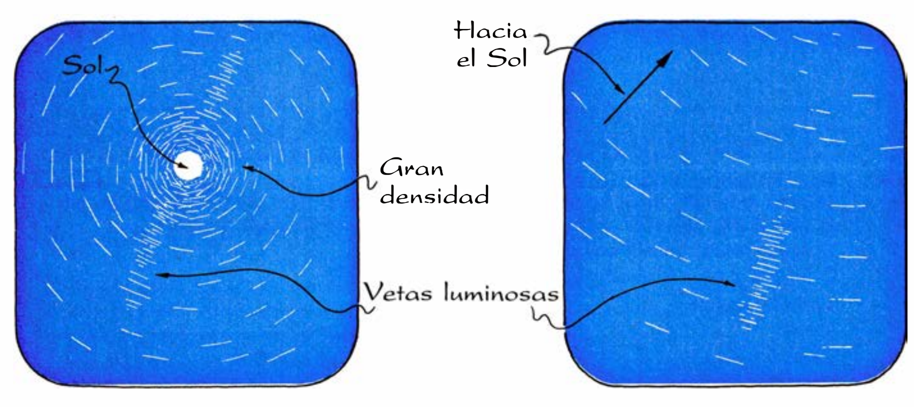
A quien esté sentado en el lado sombreado del avión, la ventanilla le parecerá clara y límpida, pero quien se halle en el lado soleado acaso descubra que la hoja externa se encuentra cubierta de arañazos diminutos y brillantes. Estos arañazos son visibles en el lado soleado del avión porque difunden la luz hacia los ojos del pasajero. En su mayoría, se deben a la acción de partículas abrasivas que chocan contra la ventanilla. De todos los arañazos que pueda haber en una ventanilla sólo se distingue una fracción; pero hay otros que pasan inadvertidos porque, dado el modo en que fueron impresos, no difunden la luz hacia los ojos del observador. Si el pasajero mueve la cabeza y cambia su ángulo de visión (o si el avión cambia de rumbo), verá arañazos diferentes o quizá ninguno.

Señala Wood que esos arañazos brillantes se agrupan en figuras. En efecto, mirando hacia el Sol, se nos presentan dispuestos sobre unos cortos arcos de círculos centrados en el astro. Pero si nos sentamos de manera que la pared de la cabina nos oculte la vista del Sol, se ofrecerán agrupados, en líneas rectas paralelas.

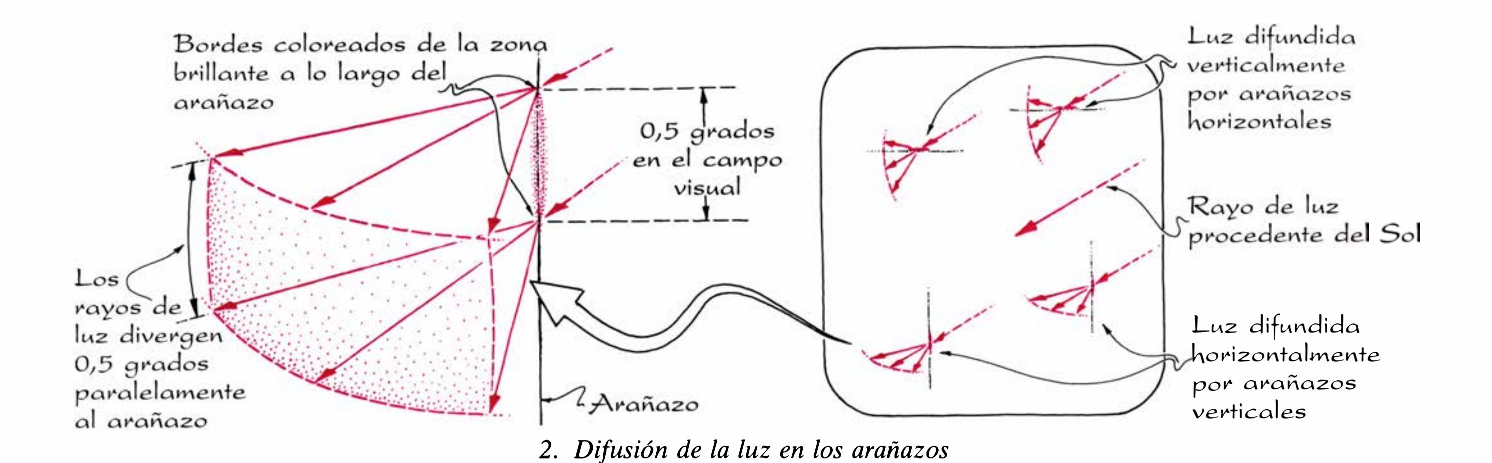
Los arañazos se caracterizaban por dos rasgos que no dejaban de desconcertarme. Cuando la luz del Sol baña una ventanilla, ¿por qué aparecen brillantemente iluminados sólo parte de ellos? ¿Por qué la iluminación se limita a una corta porción de su longitud? Después de haber realizado varios vuelos, logré ver que cuando la luz se difundía desde un punto de un arañazo, se desparramaba para formar una suerte de abanico plano y perpendicular a la longitud del arañazo [*véase la figura 2*]. El ángulo de ese abanico es pequeño, a menudo inferior a los 30 grados; la luz se desparrama a cada lado del rasguño, abriéndose en menos de 15 grados. Fuera del plano del abanico, la luz se esparce mucho menos, algo así como un grado. Por tanto, si en la ventanilla vemos un punto luminoso es que nuestros ojos deben hallarse en el plano del abanico de la luz difundida desde ese punto, o bien a menos de un grado de ese plano. Por supuesto, el resto del arañazo difunde luz, pero ésta no llega a nuestros ojos, motivo por el cual no percibimos esa parte del arañazo, como tampoco percibimos los arañazos que no envían luz en nuestra dirección.

Supongamos ahora que el Sol se encuentre exactamente enfrente del costado del aparato, y sus rayos incidan perpendiculares a la ventanilla. Todos los arañazos luminosos que se vean a la izquierda y derecha del Sol serán verticales y los abanicos de luz que emitan y lleguen a nuestros ojos serán horizontales. Los arañazos luminosos que se vean encima y debajo del Sol serán horizontales y los abanicos de luz que emitan y que también lleguen a nuestros ojos serán verticales. Habrá, además, arañazos en posiciones intermedias alrededor del Sol que, casualmente, se hallan orientados de modo que envían un abanico hacia el observador. Muchos de los arañazos luminosos se encuentran a menos de 15 grados del Sol y sólo unos pocos quedan fuera. Como los abanicos de luz difundida no son exactamente planos y el observador recibe luz procedente de arañazos orientados de todas las maneras, la densidad de arañazos luminosos será alta en las proximidades del Sol.

El "límite" de los 15 grados determina el sector de ventanilla que exhibe arañazos luminosos. Para quien esté sentado lejos de la misma, los bordes pueden caer dentro del límite y toda la ventanilla aparecerá cubierta de arañazos luminosos. Para quien se halle



1. Morfologías características de los arañazos



2. *Difusión de la luz en los arañazos*

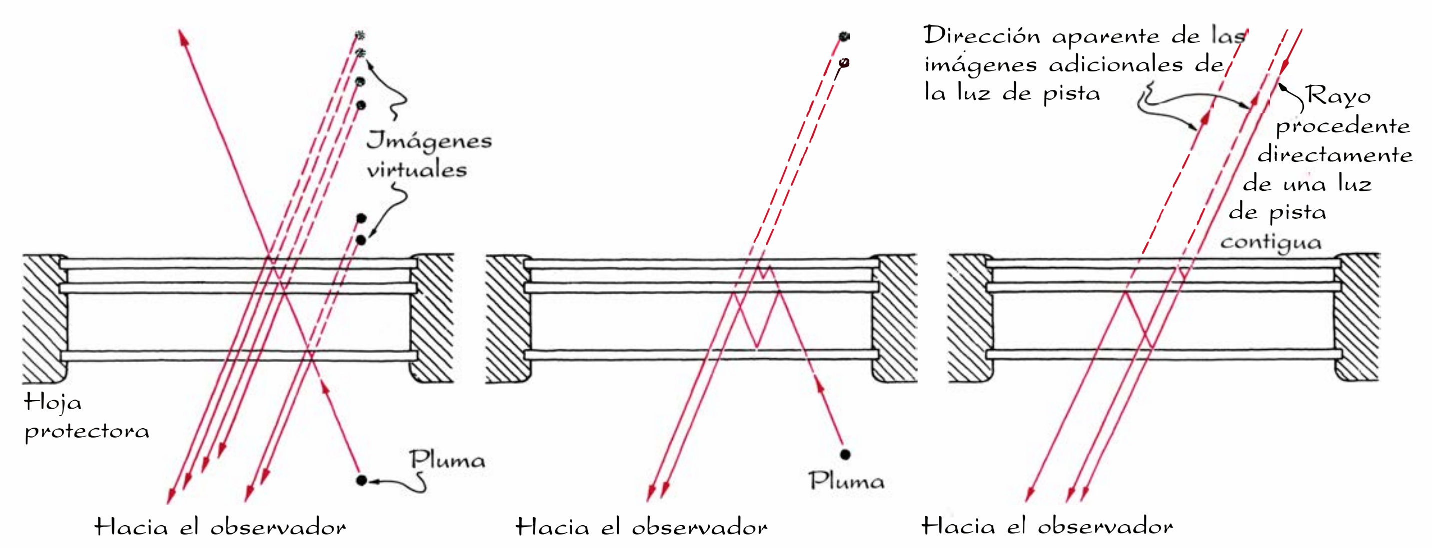
junto a la ventanilla, parte de ésta caerá fuera del límite y sólo un sector de la misma mostrará arañazos. La visibilidad de los cuales depende asimismo de la altura del Sol y del rumbo del avión. Si el Sol está alto, es de esperar que la mayor parte de la luz se difunda hacia el suelo y no hacia el observador; éste apreciará una ventanilla libre de arañazos.

La organización de los arañazos luminosos en círculos concéntricos o en líneas paralelas es otra ilusión. Acontece que nuestro cerebro busca automáticamente imponer orden en la imagen caótica de manchas luminosas que le ofrece la ventanilla; basta un número bastante alto de ellas para que remita a la conciencia la ilusión de que las manchas forman una figura geométrica. Pero, si las manchas luminosas son escasas, la ilusión desaparecerá y se verán tal cual: dispersas al azar.

Cuando abundan los arañazos luminosos, es frecuente dar con vetas de luz que apuntan hacia el Sol. Observándolas de cerca, descubrí que son abanicos de luz, procedentes de arañazos contiguos, que se solapan. La observación cercana revela asimismo que la zona luminosa de cada arañazo suele constituir un óvalo estrecho. El eje menor de ese óvalo lo determina la porción del abanico de luz que interceptan las pupilas del ojo del observador. El eje mayor del óvalo lo determinan el tamaño real del arañazo (y éste puede no ser recto) y el hecho de que los rayos de luz procedentes del Sol no sean perfectamente paralelos, sino abiertos a medio grado (pues éste es el ángulo que ocupa el Sol en nuestro campo visual). Los bordes del óvalo suelen aparecer coloreados, lo que indica que la difusión descompone la luz blanca enviada por el Sol como si se tratara de una red de difracción de laboratorio.

En un viaje reciente, descubrí otro efecto óptico curioso. Hallábame sentado en la zona soleada del avión, junto al borde delantero del ala. Hacia la mitad de la misma se veía uno de los reactores que, suspendido de ella, proyectaba su morro hacia adelante, por debajo del borde de ataque. La luz solar se reflejaba en el fuselaje hacia el motor y, desde éste, retornaba hacia mí; observaba, pues, sobre el motor una imagen especular del fuselaje. El contorno de éste se apreciaba con toda nitidez en la imagen, pero la hilera de ventanillas formaba una banda oscura, ya que en ellas la luz solar se reflejaba muy débilmente. Me pregunté entonces en qué lugar de la imagen me encontraría yo. Pero aun comprimiendo la cara contra la ventanilla, la luz que yo reflejaba resultaba muy débil para que pudiera verme. Necesitaba, pues, un reflector más potente. Así que me quité el reloj y opuse su tapa posterior metálica a los rayos del Sol. Tras jugar con la orientación del reloj durante dos o tres minutos, apareció una mancha brillante en la banda oscura que se veía sobre el motor: había dado conmigo mismo.

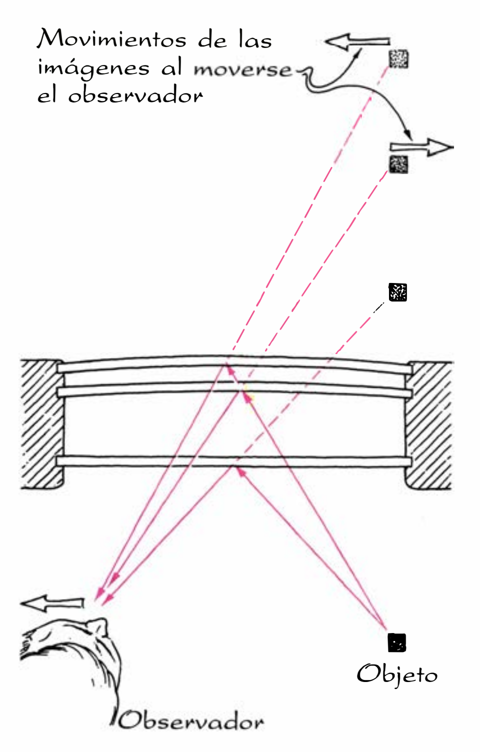
Si uno viaja por la noche, en una bu-



3. *Imágenes de una pluma en una ventanilla de avión*

4. *Imágenes producidas por reflexiones múltiples*

5. *Imágenes múltiples de una luz de pista*



6. Reflexiones en las hojas combadas

taca contigua a una ventanilla, las reflexiones pueden convertirse en motivo de entretenimiento. Debe encenderse la luz individual, de modo que nos ilumine y, también, a los objetos de nuestro entorno. Mirando directamente a la ventanilla, veremos una imagen de nuestro rostro. Pero esa imagen presentará unos contornos borrosos porque lo que de hecho estaremos viendo es una composición de tres imágenes, una por cada una de las hojas de la ventanilla. Cada una de estas imágenes se halla, de la hoja correspondiente, a la misma distancia que nuestra cara. La hoja externa produce en nuestro campo visual una imagen algo menor que la imagen creada por la hoja interior; el solapamiento de las imágenes produce los contornos borrosos.

Sosténgase un objeto brillante, una pluma metálica por ejemplo, apuntando hacia el asiento que nos precede. Muy probablemente veremos tres imágenes de la pluma. Si miramos oblicuamente hacia la ventanilla, y no directamente, separaremos las imágenes que refleja cada hoja. Si la visual es lo bastante sesgada, descubriremos que cada una de esas tres imágenes consta de un par de imágenes solapadas. En cada par, la imagen próxima será la reflexión procedente de la cara delantera (la más próxima) de la hoja y, la más lejana, la reflexión procedente de la cara posterior (la más lejana).

En la figura 3 se representan las reflexiones que originan las distintas imágenes. Cada rayo reflejado se extrapola mentalmente hacia atrás y, por ello, parece tener su origen detrás de la ventanilla. (Por mor de claridad, hemos simplificado la ilustración suponiendo que el observador se halla muy lejos de la ventanilla; un único rayo procedente de la pluma es responsable de las distintas reflexiones e imágenes. En la realidad del avión, el observador se halla junto a la ventanilla y para cada reflexión hace falta un rayo ligeramente distinto procedente de la pluma; todos los rayos convergen hacia los ojos del observador. Aquí pasaremos por alto este detalle.)

Las imágenes son pálidas porque, cada vez que la luz llega a una superficie (sea el anverso o el reverso de una hoja), sólo se refleja una pequeña fracción; el resto prosigue su propagación hacia fuera. La palidez de las imágenes hace difícil percirbirlas de día, cuando un raudal de luz llega al observador procedente del exterior del avión.

Si la noche es cerrada y la luz que refleja la pluma hacia la ventanilla posee un brillo destacado, mientras que la cabina se encuentre a oscuras, pueden verse más imágenes incluso. Débense a reflexiones múltiples entre hojas y a reflexiones entre el anverso y el reverso de cada hoja. Así, un rayo procedente de la pluma puede atravesar la primera hoja y reflejarse en la hoja central, rebotar en la primera y luego reflejarse otra vez en la central antes de llegar al observador [*véase la figura 4*]. La luz rebotada crea otra imagen de la pluma, pero ésta es muy tenue porque las tres reflexiones dejan un rayo final de baja intensidad. En la ventanilla pueden verse otras imágenes. ¿Puede imaginar el lector de qué modo se forman a partir de reflexiones múltiples?

Las imágenes creadas por reflexiones múltiples se distinguen mejor de noche y con el avión a punto de despegar. Apago entonces la luz del techo y examino una luz de pista que se encuentre, bien hacia adelante, bien hacia atrás de mí. Así, a un lado de mi visual directa hacia la luz de pista, aparece el rastro de unas imágenes que deben estar generadas por reflexiones múltiples en las hojas de vidrio de la ventanilla o en el anverso y reverso de una sola hoja [*véase la figura 5*]. La luz de pista que se encuentre exactamente en el costado del avión no ofrecerá ese efecto, porque, aunque su luz sufre reflexiones múltiples, las imágenes resultantes se solaparán y no podrán distinguirse. Cuando la luz procedente de la pista llega a la ventanilla siguiendo un trayecto oblicuo, las imágenes debidas a las reflexiones múltiples entre hojas están bastante separadas y se distinguen; las debidas a reflexiones múltiples en una misma hoja están mucho menos separadas, y cuesta más apreciarlas.

La imagen más cercana a la visual directa a la luz de pista resulta de una doble reflexión entre las dos hojas externas. La luz atraviesa la más externa, se refleja en la central y regresa entonces a la más externa, antes de reflejarse hacia los ojos del observador. La imagen lateral siguiente se debe a la luz que se refleja una vez en la hoja interna y luego en la hoja central. Próxima, pero algo más alejada de la visual de la luz de pista, se encuentra una imagen generada por la luz que se refleja en la hoja interna y luego en la externa. Puede observarse la presencia de otras imágenes, pero serán más tenues, por-

7. Reflexión de los rayos solares en una techumbre y en una masa de agua

que en ellas intervienen cuatro o más reflexiones en las hojas. Sus posiciones dependen del ángulo desde el que se mire por la ventanilla y del ángulo desde el que la luz de pista llegue a la ventanilla.

Hace poco, en un vuelo nocturno, ocupé una plaza del sector derecho del avión, en una fila extraña que dejaba un espacio adicional entre la ventanilla y mi butaca. Aquel espacio me permitía atisbar por la ventanilla inmediatamente posterior. Antes de despegar, hice un dibujo rápido de las tres imágenes que aquella ventanilla producía de uno de los brazos de la butaca posterior. Al avanzar la cabeza, las imágenes mantenían sus separaciones relativas. Más tarde, a mayor altitud, volví a examinar las reflexiones; guardaban entonces unas distancias diferentes. Además, cuando avancé la cabeza, las dos imágenes externas se movieron en sentidos contrarios: la externa, inesperadamente, se adelantó y la central se retrasó.

Sospeché entonces que la causa de las diferentes separaciones entre las imágenes y sus extraños movimientos estribaba en las hojas de vidrio que hacían hermética la ventanilla: habían dejado de ser planas y se habían abombado hacia afuera por la disminución de la presión del aire exterior. Tras garabatear dos o tres veces el efecto, encontré la explicación: la imagen externa la creaban los rayos que iban a reflejarse a la izquierda del centro de la hoja externa. Así, cuando yo avanzaba la cabeza, interceptaba otro conjunto de rayos que iban a reflejarse más a la izquierda del centro. Si la hoja hubiera sido plana, ambos conjuntos de rayos habrían parecido arrancar del mismo punto, del otro lado de la ventanilla, y la imagen que yo habría percibido hubiera permanecido inmóvil. Pero, como la hoja se había curvado, el segundo conjunto de rayos parecía tener su origen a la izquierda del primer conjunto y, por ello, cuando me movía, la imagen se desplazaba, acompañándome hacia la izquierda.

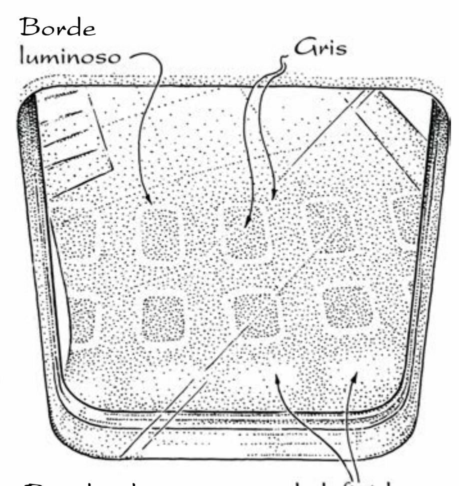
Los rayos que se reflejaban en la hoja intermedia creaban la imagen central. Estos rayos se reflejaban a la derecha del centro de la hoja. Cuando yo me inclinaba hacia adelante, interceptaba rayos que se reflejaban más a la derecha del centro; así, la imagen se desplazaba hacia la derecha, o sea, en sentido contrario a la imagen externa.

Cuando el avión aterrizó, volví a examinar el movimiento de las imágenes al adelantar la cabeza. Las imágenes externa e interna mantuvieron entonces su distancia relativa: la hoja volvía a estar plana. Sin embargo, la imagen central siguió desplazándose a su aire: la hoja central de la ventanilla aún no había adaptado su forma a la presión atmosférica normal. En otros vuelos nocturnos que realicé después, descubrí que la curvatura de las hojas podía detectarse también sosteniendo una pluma metálica ante mí. Cuando las reflexiones tenían lugar cerca del borde de las hojas externas, las imágenes de la pluma resultaban curvas.

Si el lector viaja en un día luminoso, sentado en el sector soleado de la cabina, le sugiero que atienda a las reflexiones de los rayos en las superficies de agua sobre las que esté volando. El espectáculo es óptimo cuando el aparato se encuentra en una altitud entre baja y media y en los lagos o embalses no hay olas. Una superficie acuática plana constituye un espejo que refleja una luminosa imagen del Sol. Si la masa de agua es extensa, la imagen ocupará en nuestro campo visual el mismo ángulo de medio grado que ocuparía el Sol si lo contempláramos directamente; un embalse de anchura capaz de reflejar una imagen completa cuando el avión vuele bajo puede dar sólo una imagen parcial para alturas mayores.

Pero si sobrevolamos un rosario de embalses, canales, estanques y piscinas, la imagen del Sol parece jugar al escondite, brincando de una superficie acuática a otra, pero siempre obligada a seguir el camino trazado por el vuelo del avión; al observador le parecerá moverse por encima de los trozos desparramados de un espejo hecho añicos. Otras superficies relucientes, tales como el tejado metálico de un cobertizo, o bien, si el avión está volando lo bastante bajo, las ventanillas de los automóviles parados en un estacionamiento, envían hacia arriba cortos destellos de luz, que podrían estar muy separados del camino que sigue el Sol por encima del agua plana. Hasta los parachoques de los automóviles que discurren por las carreteras y las señales de tráfico de éstas entran en juego. Tales reflexiones en las señales de tráfico me sorprendieron, pues éstas no parecen estar orientadas del modo necesario para reflejar el Sol hacia arriba. Evidentemente, el Sol es tan brillante que incluso el canto superior de una señal de tráfico puede producir una reflexión visible, aunque fugaz.

He aquí otra reflexión observable, cuyo origen habrá de descubrir el lector. Viajando en el lado soleado de un avión, divisé sobre el ala dos filas de rectángulos, formado cada uno de éstos por bordes brillantes. Los rectángulos de la fila más alejada eran más largos que los de la fila inmediata. En ciertos momentos, cuando el piloto inclinó el ala hacia arriba, las filas de rectángulos se deslizaron hacia el fuselaje e inmediatamente detrás de la segunda fila apareció una tercera. Es obvio que los rectángulos eran imágenes de las ventanillas. ¿Por qué no se presentaban formando una única fila?



8. Imágenes desconcertantes que pueden observarse en el ala de un avión

Los viajes en avión nos brindan también algunas lecciones de física de altas presiones, y no sólo de óptica. Aunque los aviones de pasajeros llevan cabinas presurizadas, la presión en éstas es siempre menor que la presión atmosférica en tierra. Una manera de observar la variación de la presión del aire durante el vuelo consiste en examinar uno de esos envases de plástico sellados que contienen un aliño gelatinoso para la ensalada que nos sirven con la comida. Con el avión en la pista, la tapa flexible del envase se halla combada hacia dentro; cuando vuela alto, la tapa se comba hacia afuera, puesto que la presión en la cabina es inferior a la del aire encerrado en el envase.

Si uno agita el envase para mezclar los ingredientes, la cara interior de la tapa se cubrirá de aliño. Al abrir el envase despegando la tapa (si uno encuentra en ella el labio del que se supone que hay que tirar), la repentina exposición del interior a la baja presión de la cabina hará que la pegajosa sustancia adherida a la tapa salga proyectada hacia fuera. Así pues, téngase cuidado en dirigir la abertura hacia la ensalada, para que el aliño no nos rocíe la pechera.

Juegos de ordenador

La máquina batiburrillo genera ondas que remedan reacciones químicas genuinas

A. K. Dewdney

Los autómatas celulares, que son modelos computarizados basados en formaciones de casillas polivaloradas, se han propagado como una onda a través de la física, las matemáticas y otras ciencias. Un nuevo autómata celular se ha puesto ahora a generar ondas por cuenta propia. Sus creadores la han bautizado "máquina batiburrillo" y es capaz de imitar reacciones químicas con una precisión rara vez vista en otros modelos.

Las reacciones que la máquina batiburrillo simula tienen lugar en medios químicos excitables: dos o más compuestos químicos que pueden disociarse y recombinarse en presencia de un catalizador. Si a los estados químicos de los reactivos les corresponden colores distintos, se observará la propagación de estructuras ondulatorias a lo largo de fronteras, sencillas o intrincadas, en interminable persecución de un huidizo equilibrio.

¿Servirá el autómata para obtener una descripción física adecuada de las ondas observadas en reacciones químicas genuinas? Esa es la cuestión que ocupa a los creadores de la máquina batiburrillo, Martin Gerhardt y Heike Schuster, de la Universidad de Bielefeld, Alemania Occidental, así como a un número creciente de colegas de otras universidades.

Podemos concebir un autómata celular como un reticulado infinito de casillas cuadradas que avanzan a lo largo del tiempo al compás de los latidos de un reloj imaginario. Cada casilla puede encontrarse, en cada latido, en uno de cierto número finito de estados. El estado de una casilla en el instante $t + 1$ depende, de algún modo sencillo, de los estados que las casillas de su vecindad inmediata tengan en el instante t. La dependencia se expresa en un sistema de reglas, válidas por igual para todas las casillas de la cuadrícula. Aplicando las reglas a cada tictac del reloj, modificamos con el tiempo una configuración inicial cualquiera de estados de las casillas: la hacemos evolucionar. En algunos casos se generan así configuraciones extraordinarias, que incitan a los observadores a creer que, proporcionándole la configuración inicial apropiada, el autómata celular podría engendrar algo capaz de organizarse por sí mismo, de crecer y reproducirse, en breve, algo "vivo".

Es probable que el autómata celular que mejor conozcan los lectores sea el famoso juego de la Vida, inventado en el decenio de 1960 por John Horton Conway, de la Universidad de Cambridge. En Vida, cada célula se halla forzosamente viva o muerta. Las reglas son muy sencillas: si una célula está muerta en el instante t, cobrará vida en el $t + 1$ si y solamente si tres de sus vecinas están vivas en el instante t; si está viva en el instante t, morirá en el $t + 1$ si en el instante t son menos de dos o más de tres sus vecinas vivas. Bastan esas dos reglas para que el autómata celular Vida exhiba una sorprendente variedad de comportamientos, que dependen enteramente de la configuración de partida de células vivas y muertas [véase "Juegos de ordenador", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1985 y abril de 1987, y los tres últimos capítulos de "Ruedas, Vida y otras diversiones matemáticas", por Martin Gardner, Editorial Labor, 1985].

La máquina batiburrillo no es un autómata celular, sino muchos. Para seleccionar una versión particular hay que especificar determinados parámetros, por ejemplo, el número de estados. Si hay $n + 1$ estados, cada uno de los posibles estados de cada casilla podrá representarse a través de un número comprendido entre 0 y n. Gerhard y Schuster generalizan la metáfora de Conway para describir los estados de las células de su máquina. Las células que se encuentran en estado 0 se denominan "sanas"; las de estado n, "enfermas". Todos los estados intermedios exhiben un grado de "contagio" correspondiente a la cifra de su estado; cuanto más se acerca a n el estado de una célula, más grave se encuentra. La máquina batiburrillo aplica selectivamente una de las tres reglas a cada casilla, dependiendo de que se encuentre sana, enferma o contagiada.

Si la célula se encuentra sana (esto es, en estado 0), en el siguiente batido del reloj tendrá un nuevo estado, dependiente del número de células contagiadas, A, y del número de células enfermas, B, que la rodeen en ese momento, así como de dos parámetros, $k1$ y $k2$. En particular, el estado de la célula en el instante $t + 1$ responderá a la fórmula siguiente:

$$[A/k1] + [B/k2].$$

Los corchetes denotan que ha de redondearse la fracción contenida en ellos. Si, por ejemplo, $A/k1$ fuese igual a 2,725, los corchetes se encargarían de reducir a 2 tal número. Por supuesto, en el caso de que la fórmula dé 0, la célula continuará sana, al menos por el momento.

Cuando una célula está infectada, por lo común su estado se agrava con el tiempo. Su estado en el instante $t + 1$ es suma de dos valores: el grado de infección que presenta el entorno de la célula en el instante t, más una cantidad invariable, g, que gobierna la velocidad con que la infección tiende a difundirse entre las células. El grado de infección se calcula dividiendo S (la suma de los números de estado de la célula y de sus vecinas) entre A, número de vecinas contagiadas. Por consiguiente, una célula infectada en el instante t adoptará, en el instante $t + 1$, el estado dado por la fórmula

$$[S/A] + g.$$

Ninguna célula infectada puede "enfermar" con gravedad superior a n. Si el valor dado por la fórmula excede de n, se toma n como nuevo estado de la célula. Finalmente, si la célula se encuentra enferma (en estado n) en el instante t, milagrosamente sana (pasa a estado 0) en el tiempo $t + 1$.

Además de las tres reglas anteriores, se precisa una definición de lo que constituye el "entorno", o vecindario, de la célula. Dos son los tipos de entornos que históricamente han venido utilizándose en los autómatas celulares: el de von Neumann y el de Moore. El entorno de von Neumann de una casilla determinada lo forman las cuatro casillas que comparten los lados con ella. El entorno de Moore lo forman las casillas del entorno de von Neumann más las cuatro que tocan los vértices de la casilla de que se trata, ocho en total. Dadas las tres reglas anteriores y la definición del entorno de cada casilla, el autómata celular de Gerhardt y Schuster se define completamente especificando los valores de cuatro parámetros: n, número de estados menos 1; $k1$ y $k2$, los factores de "ponderación" correspondientes a las células sanas, y g, la velocidad de contagio.

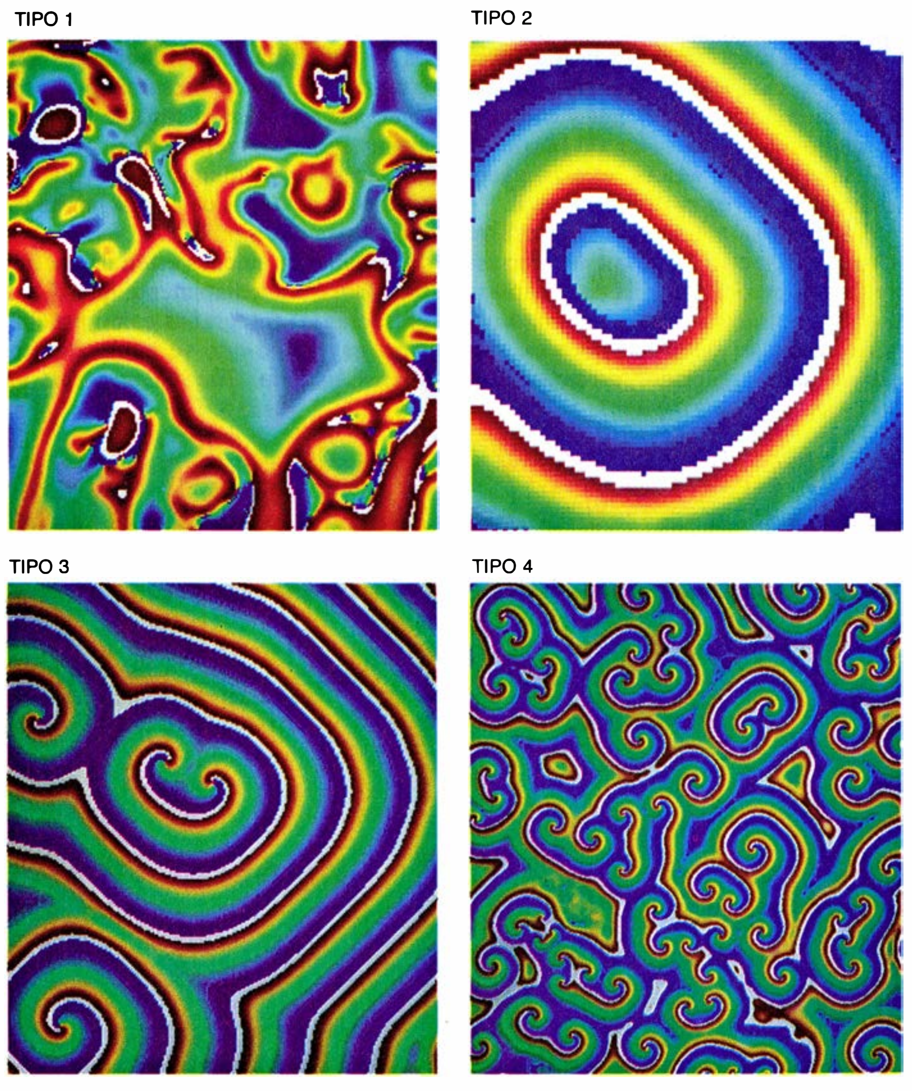
Un sencillo experimento de Gerhardt y Schuster sobre una parrilla de 20 por 20 casillas, con entornos de von Neumann, revela el comportamiento típico de las máquinas batiburrillo. (Las casillas situadas en el borde del cuadriculado se atienen a las mismas reglas que prevalecen por doquier en el autómata; salvo que su entorno consta de menos células.) Dieron a los parámetros n, $k1$ y $k2$, respectivamente, los valores 100, 2 y 3. Emergieron cuatro tipos de conducta, determinados por el parámetro g. En una pasada de prueba típica, Gerhardt y Schuster dieron a las 400 casillas de la parrilla de 20 por 20 una configuración de estados inicial estocástica, especificaron un valor de g, y dejaron suelta la máquina batiburrillo durante 10.000 ciclos de cómputo. Por ser más fácil el análisis de los datos unidimensionales que el de las imágenes bidimensionales, Gerhardt y Schuster registraron solamente el número de células infectadas en cada ciclo, al objeto de presentar sus resultados mediante gráficos como los de la figura 2.

No le ocurría gran cosa a la máquina batiburrillo para valores pequeños de g. Salvo unas pocas fluctuaciones iniciales, la actividad celular tendía a extinguirse; las células gozaban aburrida y permanentemente de excelente salud. Pero al aumentar el valor de g, comenzaron a suceder cosas extrañas. De entrada, la mayoría de las células se contagiaban y permanecían afectadas, con apariciones aleatorias e inesperadas de células sanas. Gerhardt y Schuster denominaron comportamiento de tipo 1 a esa conducta.

Observaron más tarde lo que denominaron conducta de tipo 2. Se caracterizaba por una serie, generalmente regular, de "mesetas" de infección, de unos 30 ciclos de duración, salpicadas por la aparición de gran número de células sanas. (En ocasiones sanaba la práctica totalidad de las 400 células, para experimentar más tarde una nueva epidemia de infecciones.) Al incrementar más todavía el valor de g apareció el comportamiento de tipo 3. Anunció esa conducta la aparición de una alternancia muy regular entre saturación y virtual desaparición de células infectadas cada veintena de ciclos. Apareció por fin el comportamiento de tipo 4: unos pocos ciclos después del arranque, el número de células infectadas fluctuaba con cierta regularidad en torno a un valor de saturación próximo al 75 por ciento.

Los cuatro tipos de comportamiento se sucedían unos a otros al incrementar el valor de g, pero con cierto traslapamiento. Las pasadas efectuadas con valores de transición de g exhibían unas veces un tipo de comportamiento y otras uno distinto. En ocasiones, Gerhardt y Schuster presenciaron transiciones de un comportamiento a otro en la misma pasada.

Los cuatro comportamientos representan la aparición de tipos específicos de patrones ondulatorios, que se muestran en la figura 1. En dichas imágenes en color, el tamaño de la cuadrícula va desde las 100 por 100 casillas hasta 500 por 500 unidades. Las ondas asociadas a comportamientos de tipo 1 se propagaban brevemente y de inmediato se extinguían. Las de tipo 2 se expandían en anillos circulares de anchura muy variable. Las ondas de tipo 3 exhibían la misma forma circular, pero con más regularidad, en correspondencia con los periódicos aumentos y descensos de células infectadas que refleja su gráfico. Por último, las ondas de tipo 4 seguían una pauta en espiral que se extendía a partir del centro de la cuadrí-



1. La máquina batiburrillo genera ondas de pautas características

cula. Como siempre, insto a los lectores que dispongan de ordenador a repetir el experimento a su modo. A buen seguro, ondas de pensamiento se sumarán a las de sus pantallas.

Algunas de las pautas generadas por la máquina batiburrillo remedan las exhibidas por varios sistemas químicos; en particular, algunas son idénticas a las ondas químicas que aparecen en la conocida reacción de Belousov-Zhabotinsky. Comparemos, por ejemplo, la compleja pauta de volutas de la imagen generada por ordenador con la fotografía de la reacción Belousov-Zhabotinsky de la figura 3.

¿A qué se debe esa semejanza? A Gerhardt y Schuster no les pilló desprevenidos; habían diseñado deliberadamente la máquina batiburrillo para que remedase las peculiaridades de un tipo especial de "reacción catalítica heterogénea" en la que, adsorbidos a la superficie de millares de diminutos cristalitos de paladio dispersos en un medio poroso, monóxido de carbono y oxígeno se combinan para formar dióxido de carbono. El calor cedido al avanzar la reacción de oxidación altera el estado del catalizador. Una abrupta transición de fase en el cristalito libera el monóxido de carbono adsorbido en su superficie. Entonces, el catalizador se enfría y la reacción recomienza.

La máquina batiburrillo se demostró capaz de remedar francamente bien esa reacción, pero también la de Belousov-Zhabotinski, en la que el bromato potásico oxida el ácido malónico en presencia de un catalizador, así cerio o hierro. Las casillas de la máquina batiburrillo corresponderían a partículas de catalizador y la metáfora del contagio expresaría la gradual saturación de las superficies de las partículas.

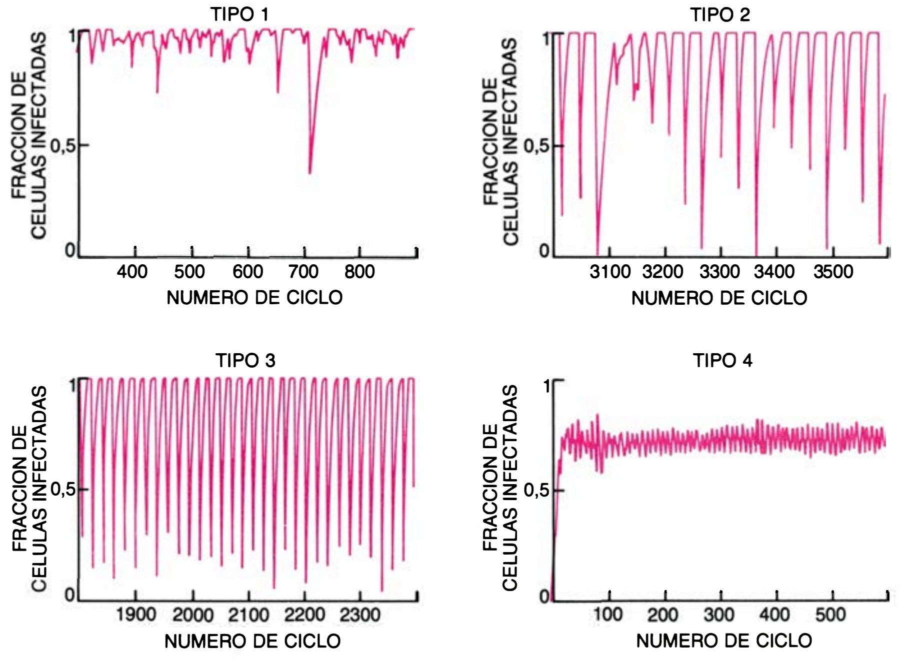
Ahora bien, la analogía no es tan simple; esconde algunas sutilezas. Para empezar, en la máquina batiburrillo las células adyacentes interactúan por intercambio de la infección, por así decirlo. ¿De qué manera intercambian reactividad las partículas de catalizador? Gerhardt y Schuster razonaron que, al menos en el caso de la oxidación del monóxido de carbono, las unidades de catalizador que intervienen influyen en sus vecinas merced a dos mecanismos básicos. Una unidad determinada puede hacerse más reactiva por transferencia de calor desde una unidad vecina más activa, o por la difusión de monóxido de carbono desde una vecina menos activa.

La interacción entre células vecinas de la máquina batiburrillo les permite sincronizar sus actividades. Al cabo de un período inicial de desorganización aleatoria (la fase de batiburrillo), las pautas que aparecen reflejan esa sincronización. Es de presumir que otro tanto sea cierto en el caso de las reacciones químicas verdaderas. ¿Explica entonces la máquina batiburrillo la aparición de ondas de excitación en las reacciones que simula?

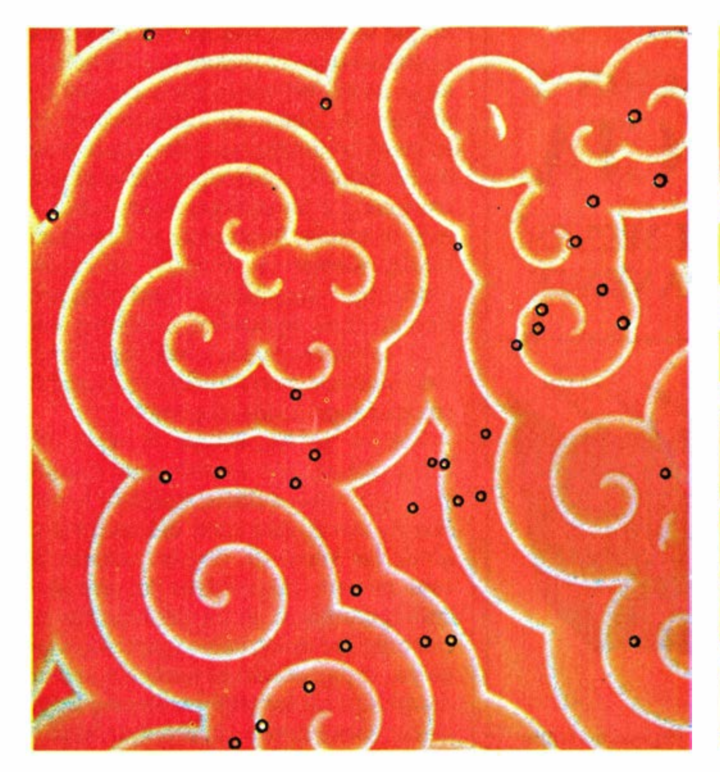
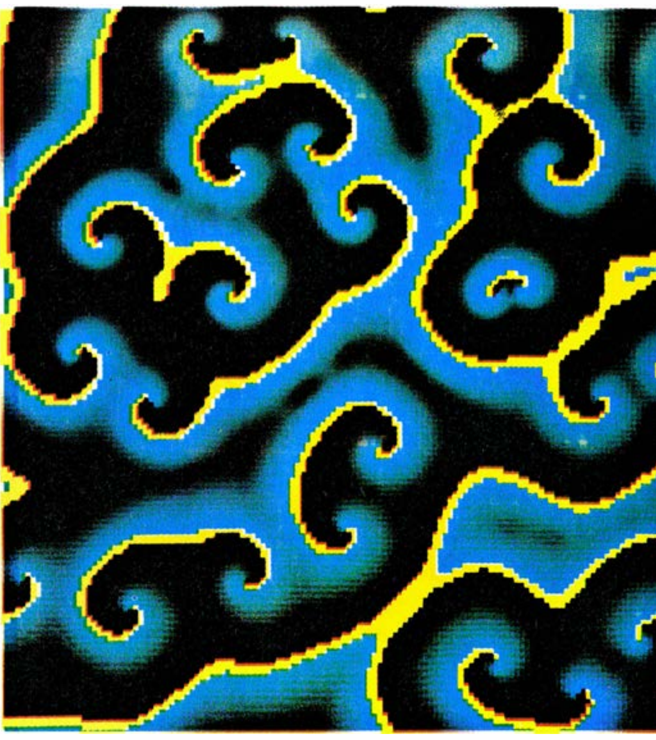
No faltarán quienes estén dispuestos a exclamar inmediatamente que sí, y a presentar las fotografías como prueba. Pero hay gente que ve autómatas celulares en todo. *The Atlantic* traía un artículo sobre las excursiones cósmicas de Edward Fredkin, en tiempos profesor universitario y que hoy se dedica a negocios de informática. Fredkin supone que nuestro universo está compuesto por células, o casillas, que van sincrónicamente saltando de un estado a otro, como un inmenso autómata celular. Por ser amables, diremos que las pruebas en favor de tal organización no son aplastantes. No cabe duda de que la máquina batiburrillo es interesante, pero todavía lo es más la actitud de sus descubridores. Por mucho que el ingenio haya simulado notablemente bien la reacción Belousov-Zhabotinsky, Gerhardt y Schuster no sostienen que la química sea celular. Por el contrario, el autómata no es para ellos sino un instrumento de aproximación, la versión discreta de una ecuación en derivadas parciales.

Inicialmente inspirados por los trabajos de los químicos Nils Jaeger y Peter Plath, de la Universidad de Bremen, Gerhardt y Schuster, junto con su mentor en Bielefeld, Andreas W. M. Dress, han reclutado la ayuda de dos químicos para el estudio de la máquina batiburrillo; S. C. Müller, del Instituto Max Planck de Fisiología de la Nutrición, en Dortmund, y John J. Tyson, del Instituto Politécnico y la Universidad estatal de Virginia. Los creadores de la máquina aspiran a demostrar que una formación de osciladores químicos que interactúen localmente de acuerdo con ciertas reglas sencillas inevitablemente generará ondas. Es probable que el número de pautas de ondulación posibles sea pequeño, si bien, según Tyson, la situación se complica considerablemente en tres dimensiones. Dado que en la cristalería de laboratorio resulta harto complicada la observación de los frentes de onda tridimensionales, las simulaciones por ordenador pueden orientar la búsqueda de los químicos. En la investigación científica la clave estriba en utilizar correctamente los modelos, no en que le utilicen a uno.

Los lectores que se animen a construir su propia máquina batiburrillo han recibido ya amplias indicaciones sobre cómo proceder. Debe declararse una tabla del tamaño apropiado e incorporarla a un gran bucle que la actualiza de acuerdo con las tres reglas y que finalmente la exhibe para edificación de los batiburrilleros locales. Cada elemento de la tabla ha de contener el número del estado correspondiente a cada célula. Durante la computación de la tabla actualizada deben almace-



2. Los cuatro comportamientos de la máquina

3. Fenómenos de ondulación en la reacción química de Belousov-Zhabotinsky (izquierda) *y sus homólogos de la batiburrillo* (derecha)

narse temporalmente los resultados en otra, hasta que haya concluido el cómputo. Un sencillo bucle doble permite entonces remplazar la tabla original entera por la actual.

También se encomienda la actualización a un bucle doble. Dos variables índice, *i* y *j*, pongamos por caso, van localizando las casillas de la matriz. Para cada una, determinada por las coordenadas (*i*,*j*) el programa (¿qué otro nombre darle, sino BATIBURRILLO?) decide mediante un par de sentencias condicionales si la casilla está sana o infectada. En caso de estar sana se procede a evaluar la primera fórmula; si contagiada, la segunda. Es preciso evaluar en cada caso los estados de las casillas de su entorno. Si la célula no está ni sana ni contagiada, es obvio que se recobrará en el ciclo siguiente.

Por razones de espacio, he de limitarme a esta breve receta. Los lectores que deseen una descripción más completa de la máquina batiburrillo pueden escribirme. Les ruego que incluyan un cheque o giro postal de 2 dólares para cubrir los gastos de correo (internacional cuando corresponda), copias y demás.

Pocos se dejaron engañar por la excursión a la isla de Apraful, el pasado mes de junio. Pero quienes se sumergieron en el espíritu de aquella aventura sintieron el desafío que representaba la reconstrucción de la máquina de multiplicación analógica de los aprafulios: un dispositivo capaz de multiplicar dos números, enteramente construido a base de cuerdas y poleas.

Algunos asumieron tan plenamente el espíritu de la empresa que llegaron a afirmar tener conocimiento de primera mano de la antigua cultura aprafulia. En esta vena, se llevó el palmarés la carta enviada por Clive J. Grant, de Chichester, New Hampshire. Un largo documento describe la correspondencia de Grant con un misterioso Dr. Ebur Gredlog, renombrado erudito de la cultura aprafulia:

"Tras leer su sección de 'Juegos de ordenador' sobre el estado de las matemáticas de Apraful, me puse en contacto con el Dr. Grebdlog para preguntarle si había tratado en su trabajo de un ... multiplicador analógico aprafulio... En efecto, me contestó, había investigado la cuestión y me enviaba un ejemplar de su trabajo."

El "trabajo", redactado con la florida caligrafía de Grebdlog, iba acompañado de dibujos técnicos de levas y poleas conectadas por puentes. Grebdlog hace notar que los diseños "parecen haber servido de guía a los aprafulios en la construcción de un dispositivo verdaderamente notable, en vista del muy generoso esfuerzo técnico aplicado a su desarrollo, pero más notable todavía por su total falta de utilidad".

El multiplicador que más a menudo propusieron los lectores se valía de una barra, uno de cuyos extremos pivotaba en un gozne fijo. Una cuerda de entrada, atada a medio camino de la barra, tira de ella hacia adelante, de modo tal que en el mismo sentido se tensa una cuerda fija al extremo libre de la barra.

Dado que la barra no es más que una palanca de tercer orden, con el fulcro en el gozne, la cuerda de salida avanza más que la cuerda de entrada. El diseño adolece, empero, de falta de proporcionalidad: al jalar de la cuerda de entrada, la barra describe un arco circular y, al final, el efecto amplificador desaparece.

Ciertas variaciones del tema corrigieron el desplazamiento circular de la barra mediante sistemas de guías o ingeniosos sistemas de varillas paralelas articuladas. Todo ello me chocó por su complicación. Quizás hubiera debido prohibir expresamente el uso de varillas y palancas.

Robert Norton, de Madison, Wisconsin, se sirvió de poleas en espiral para calcular logaritmos y antilogaritmos. Las cuerdas de entrada *A* y *B* se desenrollan de dos tambores (lo que no contraviene las reglas, pues no son otra cosa que poleas anchas). Cada tambor está acoplado a un tambor en espiral en

el que se enrolla una cuerda de salida. Seguidamente se suman las dos salidas de la forma esbozada hacia el final del artículo de junio. El antilogaritmo de su suma se computa arrollando la cuerda de adición sobre un tambor espiral conectado a un tambor recto, sobre el cual se arrolla finalmente la cuerda de salida. Robert A. Eddius, de Nueva York, ha "descubierto" una máquina similar. Los aprafulios, sostiene Eddius, se valieron de las conchas de ciertos moluscos, ¡cuya espiral les permitía calcular logaritmos exactos!

Por su parte, David A. Fox, de Lima, Ohio, nos escribe anunciándonos que una cultura similar habitó Hardly Atoll, una islita del archipiélago de las Marshall, donde, además de esos mismos dispositivos logarítmico-antilogarítmicos, se ha descubierto recientemente un artilugio, parecido a un yo-yo, capaz de elevar números al cuadrado. Quizás los lectores deseen reflexionar sobre la verosimilitud de lo afirmado por Fox.

Caxton C. Foster, de East Orleans, Massachusetts, sostiene que la civilización de los aprafulios sucumbió a la ganancia lógica: el problema con que se encuentra un ordenador en el que la salida "1" de cada puerta lógica no llega a ser del todo un 1. Para evitar que tales imprecisiones se infiltrasen en los cómputos sacros, los altos sacerdotes situaron un aprafulio en cada puerta, para que tirase un poquito más fuerte de las cuerdas de salida que carecieran de la tensión necesaria. Absorta en esta tarea, la gente fue incapaz de procurarse alimento y acabó muriendo de inanición.

Las últimas palabras pertenecen a un arquitecto de computadores contemporáneo, Michael Pagan, de Mount Laurel, New Jersey. Preocupado por el hiato cultural entre las ramas analógica y digital de la sociedad aprafulia, Pagan desarrolló un maravilloso convertidor de analógico a digital. Una sola cuerda, que porta la señal analógica, penetra en el dispositivo, del cual salen cierto número de cuerdas que contienen el equivalente digital del valor de entrada. Si acaso llegó a introducirse tal máquina en Apraful, a buen seguro los sacerdotes anatematizaron tan pagano dispositivo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ARMCHAIR UNIVERSE. A. K. Dewdney. W. H. Freeman and Company, 1988.

DID THE UNIVERSE JUST HAPPEN? Robert Wright en *The Atlantic*, vol. 261, n.º 4, págs 29-44; abril de 1988.

Libros

Laetoli hoy, humedales españoles y los textos filosóficos del helenismo

Luis Alonso, Juan Gallardo y Emilio Lledó

LAETOLI. A PLIOCENE SITE IN NORTHERN TANZANIA. Dirigido por M. D. Leakey y J. M. Harris. Clarendon Press; Oxford, 1987.

Laetoli es, para los paleontólogos, lo que las islas Galápagos para los naturalistas. La mención de su nombre evoca ya, para el hombre culto, la idea del yacimiento de homínidos por excelencia y los trabajos pioneros de Mary y Louis Leakey, pero muy pocos saben que constituye una auténtica arca de Noé de organismos fosilizados: restos polínicos y huesos de todos los grupos vertebrados, amén de trazas de muchos invertebrados, conforman un compendio maravilloso de la historia natural de un ayer no excesivamente remoto.

Laetoli es el término que usan los masai para designar una planta común del contorno: *Scadoxus multiflorus*. A P. E. Kent le pareció en 1941 un hermoso nombre para bautizar el lugar y el término hizo fortuna gracias a su adopción por los Leakey, que lo prefirieron a los también empleados de Garusi, Serengeti meridional o series fluviales de Vogel, que podemos leer en los primeros ensayos. Otra transcripción del yacimiento —Laetolil— se ha reservado para ciertos niveles de fósiles. En una espléndida introducción a la obra, Mary D. Leakey nos cuenta, entre otros detalles de ese tenor, las etapas de su descubrimiento, las campañas, la división de los campos de trabajo, la incorporación de las nuevas herramientras de datación, la pequeña historia de cada lecho y los expertos que intervinieron. Y, por tratarse de una obra de investigación, lo completa con mapas y cuadros estadísticos de fragmentos esqueléticos recuperados, especímenes y demás.

La obra, lo acabamos de decir, es de investigación. Pero decantada en ciencia. Esto es, un reputado abanico de expertos internacionales —de campo y laboratorio— nos ofrecen, substanciado, el estado del conocimiento de los grandes grupos zoológicos representados sin perder la visión global de la mutua interrelación. Por expresarlo brevemente, el libro nos expone qué podemos ver hoy de la evolución orgánica desde esa ventana única de Tanzania. No es, pues, una instantánea, un corte sincrónico, sino una serie de fotogramas diacrónicamente encadenados de los animales en su medio y en su lucha por la subsistencia. En particular de nuestros ancestros homínidos, al que se le dedican dos capítulos: el quinto (de Mary D. Leakey), sobre los restos óseos de homínidos, y el trece, sobre las pisadas fosilizadas. En este último, que sigue a un detenido estudio sobre huellas de animales, colaboran, en sendos apartados, Leakey, L. M. Robbins y R. H. Tuttle.

Mary D., tras recrear el descubrimiento de las pisadas, se lamenta de un error frecuente en el trabajo pionero de campo: no percibir el valor real de lo hallado; en su caso, no advertir que eran tres los individuos que habían dejado su impronta. "Los análisis *in situ* de las huellas de los yacimientos A y G, escribe por su parte Robbins, los realicé durante las campañas de 1978 y 1979. Las mascarillas o duplicados de algunas de ellas que hizo Peter Jones se estudiaron en el laboratorio de Olduvai en 1980. Ese tipo de trabajo comportaba fotografiarlas todas y cada una para su registro permanente —las fotografías se sacaron con luz del alba y del atardecer— y tomar los datos relativos a sus dimensiones y rasgos morfológicos..." Da cuenta luego de los resultados y las dudas planteadas: ¿paseaban los tres individuos juntos o lo hicieron en momentos distintos? Para aportar una respuesta verosímil —a ese interrogante o a otros— el paleontólogo debe repetir, si puede, el experimento, es decir, recrear la escena *in vivo*. Pero las huellas dicen mucho más acerca del sujeto que las dejó. Al paleontólogo le resuelven cuestiones de interés capital como las relativas al bidepalismo terrestre de los homínidos hace ya tres millones y medio de años: de eso se ocupa el trabajo de Tuttle.

En un yacimiento importa conocer el substrato geológico que ha posibilitado la fosilización. Laetoli se halla en la región septentrional del Valle del Rift, en un terreno fallado. Hay, autor del capítulo sobre geología, datación y palinología de la zona, analiza pormenorizadamente la potencia de las tobas fosilíferas de Laetolil, Ndolanya y Olpiro, y resume, a propósito de los resultados del estudio del polen, que nos situamos en una vegetación de sabana abierta con predomino de gramíneas. En ese lugar, ¿qué animales medraban? El grueso de la obra contiene la respuesta, trenzada de recuentos, mediciones, fotografías, cuadros, dibujos, mapas e interrogantes, que nos revelan desde el hábitat abierto de grandes mamíferos hasta el microhábitat cerrado de los termiteros. Sin hipérbole, hemos de reconocer que nos hallamos ante una de las mejores obras de la década. (L. A.)

SEMINARIO SOBRE BASES CIENTÍFICAS PARA LA PROTECCIÓN DE LOS HUMEDALES EN ESPAÑA, por Ramón Llamas *et al.* Real Academia de Ciencias; Madrid, 1987.

La obra recoge las ponencias del seminario celebrado en Madrid los días 22 y 23 de enero de 1987, y que versó sobre las bases científicas para la protección de los humedales en España. Dicho seminario se consideraba un acto más, dentro del Año Europeo del Medio Ambiente 1987/1988, organizado por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que patrocina el volumen. Sorprende, sin embargo, que no aparezca en ningún lugar el bonito y verde anagrama que ha caracterizado el Año Europeo del Medio Ambiente.

En total se exponen 16 trabajos seleccionados (cinco sesiones), más una corta presentación del académico Llamas Madurga y unas conclusiones finales elaboradas por los participantes. Los autores de dichos trabajos son personalidades muy conocidas dentro del ámbito de la ecología: González Bernáldez, Margalef, Castroviejo, Rivas-Martínez, etcétera. Corre a cargo del primero establecer el marco conceptual de los humedales españoles, partiendo de las ideas del pionero español Huguet del Villar. González Bernáldez establece cuatro tipos de zonas encharcables, a saber, criptohumedales, depresiones secas, depresiones de infiltración lenta y depresiones en zonas de descarga; también da realce a la composición química de las aguas (sales), que obviamente tiene reflejo en la vegetación correspondiente (hidrófilas, halófilas, etc.). Los modelos posibles

para estos sistemas son abordados por el profesor Margalef.

Emilio Custodio da a continuación una sencilla clasificación de los complejos que denomina palustres (permanentes, temporales turbios, temporales dulces y temporales salinos) que es bastante ilustratiava; en este esquema insiste Miguel Alonso, señalando las poblaciones que los caracterizan. Posteriormente se pasa a descriptivas de áreas lagunares o encharcables españolas como La Mancha, Las Marismas, el Mar Menor, el Delta del Ebro y otras; como es de esperar hay trabajos que versan sobre aspectos de vegetación, aves, microorganismos, hidrología, etcétera.

Las conclusiones reconocen que gran parte de los humedales se han conservado hasta nuestros días debido a que eran zonas poco aptas para el asentamiento y aprovechamiento humano, pero que paulatinamente van disminuyendo en superficie por el empleo de una tecnología más refinada; repiten que es necesario cesar en esta acción destructiva de las áreas lagunares por servir de reserva a gran número de especies vivientes, por su interés paisajístico o por constituir zona de mantenimiento de las especies migratorias; consecuentemente, abundan en el tópico usual en este tipo de jornadas sobre la importancia de fomentar los estudios interdisciplinares y mantener la financiación de los citados estudios; finalmente, se insta a la Administración para que tome medidas legales y efectivas para el mantenimiento, conservación e incluso regeneración de las áreas lagunares, aun cuando se reconocen las situaciones de conflictos que pueden surgir con los agricultores o ganaderos que las pueblan.

Las teorías conservacionistas a veces caen, se advierte aquí, en la contradicción de que, por una parte, se oponen a la eliminación de lagunas y, por otra, a la construcción de presas (lagunas artificiales). Obviamente todo es estudiable, pero sólo hay que observar algunos embalses del oeste español (sobre todo los medianos) para comprobar que en pocos años unas encinas resecas dan paso a una diversidad de aves, sobre todo, que vuelven blancas las ramas que emergen de las aguas, atrayendo la población circundante merced a la pesca y al oasis de frescor que representa.

El libro es, por tanto, de interés para quienes se sienten sensibilizados sobre esas cuestiones o han escogido como tema de investigación algún aspecto de las marismas, marjales, deltas, aiguamolls, lagunas, lavajos, bodones, navas, salgüeros, salobrales, sotos, bosques, galerías, etcétera. (J. G.)

THE HELLENISTIC PHILOSOPHERS. VOL. I. TRANSLATATIONS OF THE PRINCIPAL SOURCES WITH PHILOSOPHICAL COMMENTARY, por A.A. Long y D.N. Sedley. Cambridge University Press, 1988.

Concebido con el propósito de hacer, con la filosofía del helenismo, una recopilación de fuentes tan útil como la que hicieron hace ya más de 30 años Kirk y Raven con los presocráticos, los autores de esta selección de textos han llevado a cabo algunas modificaciones importantes. El material que en la obra de Kirk y Raven (la reciente edición se ha enriquecido con la colaboración de Schofield) presentaba, en el mismo volumen, los textos en griego, junto con su traducción y sus correspondientes comentarios y anotaciones, en la "antología" de Long y Sedley se ha dividido en dos volúmenes. El primero de ellos, que es el objeto de esta nota bibliográfica, comprende la traducción inglesa de los autores seleccionados, acompañados de un "comentario filosófico" y de un glosario de términos, así como de un índice de fuentes, de filósofos y de materias. En un segundo volumen, se publicará el texto original griego, con el correspondiente aparato crítico y otra serie de informaciones filológicas.

La obra de Long y Sedley va a constituir, sin duda, incluso desde el punto de vista comercial, un éxito, como lo ha sido la de Kirk y Raven, que se ha reeditado una docena de veces y es un imprescindible libro de consulta para el estudio de los presocráticos. Porque, efectivamente, la historia de la filosofía griega necesita este tipo de trabajos. Sobre todo en aquellas épocas que, como la presocrática o la helenística, han visto mermadas su producción escrita por los azares de la historia. La obra de Platón y Aristóteles que se ha conservado en una buena parte, y que nos permite hacernos una idea bastante precisa de lo que "dijeron", se encuentra cercada por dos impresionantes silencios. No es que carezcamos de información alguna, y que no poseamos fragmentos de los presocráticos, de los epicúreos o estoicos; pero, probablemente, nuestro conocimiento del epicureísmo, por ejemplo, sería muy distinto si poseyésemos completos algunos de los trescientos libros que, según Diógenes Laercio, escribió Epicuro. Sobre todo, si aceptamos la tesis de Long y Sedley que ni Platón ni Aristóteles tuvieron la obsesión *sistemática* de los filósofos del helenismo por encontrar el "puesto del hombre en el cosmos". Tal vez, al perderse el ideal de una "filosofía de las cosas humanas", los estoicos, sobre todo, extendieron más allá de la "política" y la organización social las fronteras que habrían de procurar la "felicidad". Este impulso "cosmopolita" iba a encontrar un eco en todas aquellas doctrinas que pondrían la plenitud de la vida en "otra vida", al otro lado de lo humano.

El interés de esta recopilación consiste, pues, en ofrecernos las bases para un replanteamiento de los principios en torno a los que se organizó la filosofía del helenismo. Sólo conociendo, con la mayor fidelidad, la "letra" de este gran legado filosófico, podemos llegar a entender su sentido. Este rigor por transmitirnos la herencia de la filosofía helenística, en sus "justos límites", hace que el supuesto "philosophical commentary" no se parezca en nada a lo que, en otras latitudes filosóficas, pudiera entenderse por tal. En el comentario filosófico de Long y Sedley se trata, fundamentalmente, de aclarar conceptos, establecer conexiones, glosar determinados pasajes, detallar algunos planteamientos, establecer lugares paralelos. En ningún momento encontramos un comentario "filosófico" que tuviese que ver con interpretaciones o "especulaciones" en torno a los textos seleccionados. Por ello, el adjetivo filosófico podría llamar a engaño a quien no esté muy acostumbrado a la manera de historiar la filosofía, que es usual en los investigadores anglosajones y, por poner un ejemplo muy representativo por la indudable calidad de su obra, que encontraríamos en la monumental *A History of Greek Philosophy* de W.K.C. Guthrie, interrumpida en el sexto volumen con la muerte de su autor. La historiografía se reduce, pues, a "contar", con detalle y extraordinaria erudición, el supuesto "contenido" de lo "dicho" por los filósofos, siendo ese "dicho" el centro estructurador y organizador de cualquier posible "especulación" que, en todo momento, no hará sino "reflejar" el texto en el espejo de todos aquellos datos "técnicos", que pudieran aclarar y pulimentar esa superficie textual.

Toda historiografía filosófica ha de partir, pues, de un cuidadoso establecimiento del material escrito, que guarda el "pensamiento" de los filósofos. Por muy rica que sea la hermenéutica que dialoga con los textos y lleva a cabo esa "fusión de horizonte" a la que Gadamer se ha referido, el origen de todo

diálogo está, precisamente, en esos escritos que lo inician y lo sostienen. Es verdad que el "tiempo" de la escritura sólo vive en el tiempo del lector, en los ojos que leen, en la mente que, detrás de esos ojos, aportan al "acto de lectura" el momento concreto de una determinada perspectiva histórica, de una educación, de una personalidad; pero aunque el lector ponga las "significaciones" y el sentido, el mensaje histórico únicamente puede iniciarse desde esa real soledad del texto, en cuya estructura se cobija y articula el pensamiento.

La lectura de la filosofía helenística, como la de cualquier tradición que perviva a través de la escritura, requiere ese meticuloso proceso de investigación que conduzca a determinar el espacio en el que resuena esa "voz", que habla en la escritura y a la que hay que prestar nuestro tiempo y nuestro propio aliento. Pero, precisamente, en la filosofía helenística, como en la presocrática, esa voz resuena entrecortadamente. Los avatares de la transmisión textual no sólo han hecho que los textos originales se perdieran, sino que muchos de ellos los hemos tenido que descubrir en obras de otros autores, que los utilizaban e incorporaban a sus propios pensamientos. No es tanto la voz de los filósofos cuanto sus ecos, las resonancias que han llegado a épocas posteriores, lo que encontramos entre los restos de la tradición.

La obra de Long y Sedley está dividida en cinco apartados. Después de una breve introducción, el primero de éstos recoge los textos del pirronismo antiguo, fundamentalmente de Pirrón de Elis y Timón de Fliunte. Pero estos textos son los de Diógenes Laercio, Sexto Empírico, Cicerón, Séneca. A través de estas referencias indirectas, podemos empezar a pensar el pensamiento de la primera forma de escepticismo. Por consiguiente, en un planteamiento exigente de la rigurosidad del testimonio, si queremos llevar nuestra exigencia de "textualidad" al límite, hemos de conformarnos con oír una voz, de la que sólo nos llega el eco, resonando en el espacio de "otro" autor.

Una buena parte del pensamiento antiguo es ya un pensamiento "interpretado" y esa interpretación es un elemento constituyente del posible texto "originario", que pervive únicamente en el cauce de una tradición que lo reelabora.

Los dos apartados más extensos son los dedicados al epicureísmo y al escepticismo. Por lo que respecta a los textos epicúreos, es Diógenes Laercio el principal transmisor. Como es sabido, el libro décimo de la *Vida de los filósofos* está exclusivamente dedicado a Epicuro, y es este libro, hasta ahora, la fuente principal de los textos originales del filósofo de Samos. Pero se han recogido numerosos textos de Lucrecio, Cicerón y algunos interesantes pasajes del *De abstinentia* de Porfirio. Los fragmentos del *Peri Physeos*, encontrados en los papiros herculanenses y que Arrigheti incorporó a su excelente edición de Epicuro, también se traducen, así como un largo pasaje de Polístrato que forma parte del *De Contemptu*, publicado en edición crítica, a principios de siglo, por Karl Wilke y cuyo papiro ha sido leído nuevamente y editado por Giovanni Indelli, en la colección de textos herculanenses que, bajo la dirección de Marcello Gigante, publica el "Institutuo Italiano per gli Studi Filosofici". Tal vez, por la reciente fecha de su publicación en 1986, no ha podido incorporarse ningún texto del *De Musica* de Filodemo, que se conserva en el "papiro herculanense 1497" y que, en magistral edición crítica, ha publicado Annemarie Neubecker en la mencionada colección.

Referencias indirectas son, en su mayoría, las que nos quedan de los estoicos. Diógenes Laercio, Plutarco, Cicerón, etcétera, son los principales transmisores; pero poseemos también una edición clásica del texto griego y latino de esas referencias, parecida a la que a finales del siglo pasado hizo H. Usener de los "Epicurea": la edición de Hans von Arnim que, en 1905, publicó sus *Stoicorum veterum fragmenta*. También existe, en traducción francesa, una amplísima selección de textos que, con el título "Les Stoïciens", ha aparecido en la editorial Gallimard traducidos por E. Brehier y prologados por P-M. Schuhl. Pero los textos de esta edición, al reproducir algunas obras en su totalidad, por ejemplo de Séneca, Epicteto y Marco Aurelio, así como libros completos de algunos de los tratados de Cicerón, son de menos utilidad que la edición de Long y Sedley, que nos ofrecen los textos seleccionados y organizados por temas, y distribuidos por tópicos que facilitan el uso de la obra.

Los "Académicos" y el "renacimiento del pirronismo" son los apartados que cierran este libro que, sin duda, contribuirá al mejor conocimiento de la filosofía helenística, de la que Anthony Long había escrito, hace unos años, una buena introducción con el título *Hellenistic Philosophy* y que tradujo al castellano, en 1977, la editorial "Revista de Occidente". (E. Ll.)

Apuntes

De las rocas expuestas, las más antiguas de nuestro planeta se encuentran en los escudos, que son las regiones centrales de los continentes. Allí han permanecido sin grandes alteraciones durante miles de millones de años. Pero, ¿qué decir de las estructuras subyacentes? Alguna, en particular aquella sobre la que se apoya el Escudo Canadiense, se habría mantenido bastante estable y habría resistido la fragmentación del supercontinente Pangea.

Entre los problemas astrofísicos que presenta la supernova 1987A uno es el relativo al color de su progenitor. ¿Por qué una supergigante azul, si lo acostumbrado hasta ahora eran supergigantes rojas? El color remite al segmento del espectro de radiación y depende de la temperatura de superficie, fruto, a su vez, de las transformaciones moleculares operadas en la estrella. El análisis espectrográfico de la evolución de ese objeto estelar pone de manifiesto que el progenitor fue en un comienzo una supergigante azul, luego roja y de nuevo azul.

Ningún árbol de los paseos y avenidas de Madrid aloja ya epífito alguno, tal es el grado de contaminación de la capital de España. Confinadas en sus parques encontraremos, a duras penas y sobre troncos de ejemplares agrietados y estériles, las mismas especies de epífitos, sólo cinco, que descubrimos en otra ciudad mucho menor y con menos árboles: Avila.

La vida no empezó en las chimeneas hidrotérmicas de las crestas de las dorsales oceánicas. La hipótesis que lo sugería, muy extendida ya en la comunidad científica, ha recibido un mazazo con el trabajo reciente de Stanley L. Miller y Jeffrey L. Bada. En opinión de éstos, los tres hitos en que se basa dicha hipótesis carecen de sostén: la síntesis pirolítica de aminoácidos sería allí un proceso ineficaz, no existiría la pretendida polimerización de aminoácidos en péptidos y, en tercer lugar, resulta incompatible un ambiente hidrotérmico con proto-organismos de ARN.

Desde el mes de agosto de este año se ha puesto en marcha lo que pretende ser una revolución en la formación del médico. La Declaración de Edimburgo, como se conoce su documento programático, se propone dar un golpe de timón y limitar la preponderancia del enfoque hospitalario de las facultades de medicina. Hay que centrarse ahora, defiende el texto, en la atención a las condiciones de salud. O en castizo: más vale prevenir que curar.

Según datos que hará públicos dentro de poco la Agencia Espacial Europea (ESA), giran en torno a la Tierra de 30.000 a 70.000 fragmentos desprendidos de otros cuerpos mayores. Además de los 7000 ingenios que controlan las dos superpotencias. ESA ha mostrado su preocupación por la integridad del satélite Hiparcos y el telescopio espacial Hubble. Calcula que el riesgo de choque contra un fragmento de 10 centímetros de diámetro que, en sus 17 años de vida, correrá Hubble, es de sólo el 1 por ciento. Pero el choque de una pella del tamaño de un guisante que se mueva a 5 km por segundo acabaría con Hiparcos.

Aunque el libre acceso del público al sulfato de dextrano puede obstaculizar los ensayos de nuevas terapias contra el SIDA, varios países prefieren hacer la vista gorda ante la importación de dicha droga, fabricada exlusivmente en Japón. El sulfato de dextrano, indicado para rebajar los altos niveles de grasas en sangre, rechaza la invasión del virus HIV en los cultivos celulares; por eso muchos pacientes acuden a ese fármaco en su automedicación.

Es doctrina aceptada en paleontología que el tamaño del hueso constituye un buen criterio de estimación de la edad del individuo fósil. Tras recientes investigaciones de reptiles del Pérmico parece más adecuado prestar mayor confianza a la morfología ósea, que depende de la fase de desarrollo en que se encuentra el animal.

Otra hipótesis paleontológica que puede caer es la que asocia la habilidad de tallar la piedra con la aparición del género *Homo*. Las primeras muestras de lascas y otros útiles se remontan unos 2,5 millones de años atrás: un tiempo en que coexistieron distintas especies de homínidos. De lo que podría inferirse, para algunos, que el hombre habría heredado comportamientos fijos y estereotipados de ancestros homínidos.